

УДК 52-852; 52-466; 520.16

## КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ДАТЧИКА ШАКА–ГАРТМАНА

© 2022 С. А. Потанин<sup>1,2,3\*</sup>, М. В. Корнилов<sup>1,2,4</sup>, А. Д. Саввин<sup>2</sup>, Б. С. Сафонов<sup>2</sup>, М. А. Ибрагимов<sup>3</sup>, Е. А. Копылов<sup>5,3</sup>, М. А. Наливкин<sup>3</sup>, В. Е. Шмагин<sup>3</sup>, Л. Х. Ху<sup>6</sup>, Н. Т. Тао<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

<sup>2</sup>Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

<sup>3</sup>Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

<sup>4</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, 105066 Россия

<sup>5</sup>Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, 634055 Россия

<sup>6</sup>Вьетнамский национальный космический центр, Ханой, 100000 Вьетнам

Поступила в редакцию 23 ноября 2021 года; после доработки 1 февраля 2022 года; принята к публикации 1 марта 2022 года

Изложены основные принципы создания комплекса для проведения астроклиматических исследований, в конструкции которого использованы коммерчески доступные стандартные технические решения для его быстрого возведения и массового тиражирования. В состав комплекса входят телескоп диаметром 305 мм,  $F/8$ , системы Ричи–Кретьена на экваториальной монтировке, купол и автоматическая метеостанция с датчиком облачности. В качестве прибора для изучения параметров атмосферной турбулентности, в том числе высотного профиля, предлагается использовать только датчик Шака–Гартмана с субапертурой размером  $30 \times 30$  мм. Возможность реализации такого подхода подтверждена исследованиями последних лет и численным моделированием, выполненным авторами.

Ключевые слова: атмосфера — атмосферные эффекты, турбулентция — астроклимат

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Астроклиматические исследования являются актуальной задачей при выборе места для строительства астрономической обсерватории. Они особенно важны в том случае, если планируется размещение и эксплуатация крупного телескопа. Помимо того что оценивается количество ясных ночей, ветровой режим, влажность и т.д. за достаточно долгий период времени (не менее года), необходимо также изучить свойства и параметры атмосферы: статистику размеров атмосферных изображений звезд (seeing), экстинкцию и высотный профиль оптической турбулентности. Последнее требуется как для выбора корректной системы адаптивной оптики (АО), так и для гибкого распределения наблюдательного времени. Таким образом, астроклиматический комплекс должен работать задолго до установки телескопа и в ходе его последующей работы. Примерами такого комплекса являются астроклиматический пост Кавказской горной обсерватории ГАИШ

МГУ (КГО ГАИШ МГУ) (Kornilov et al. 2014), астроклиматический монитор Европейской южной обсерватории (Chiozzi et al. 2016) или монитор Канарского института астрофизики (Delgado et al. 2010).

### 2. ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДАТЧИКА ШАКА–ГАРТМАНА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВЫСОТНОГО ПРОФИЛЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Для качественной оценки параметров атмосферы, таких как угол изопланатизма, необходимо знать распределение мощности оптической турбулентности по высоте. Определить полную мощность всей оптической турбулентности, а вместе с ней и радиус Фрида, сравнительно легко, они связаны между собой следующим выражением:

$$r_0 = \left[ 0.423 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \sec(z) \int_0^{H_{\max}} C_n^2(h) dh \right]^{-3/5}, \quad (1)$$

\*E-mail: sr.potanian@gmail.com

где  $r_0$  — параметр Фрида,  $\lambda$  — длина волны,  $z$  — зенитное расстояние,  $C_n^2(h)$  — мощность оптической турбулентности на высоте  $h$ ,  $H_{\max}$  — верхняя граница турбулентной атмосферы. Измерить  $r_0$  можно, например, по дифференциальным дрожаниям изображений в двух круглых субапертурах, разнесенных в пространстве на небольшое расстояние (например, с помощью Differential Image Motion Monitor, DIMM), как показано в работе Sarazin and Roddier (1990). Важной особенностью DIMM является независимость результата определения  $r_0$  от дрожаний монтировки телескопа.

Для восстановления распределения  $C_n^2(h)$  можно использовать пространственный спектр амплитудных флуктуаций световой волны после распространения через всю атмосферу. Как правило, исследование пространственного спектра амплитудных искажений выполняется методом измерения индексов мерцания в кольцевых апертурах (например, с применением Multi-Aperture Scintillation Sensor, MASS) (Kornilov et al. 2007). Метод основан на линейном разложении индекса мерцания по произведениям  $C_n^2(h)$  на соответствующие весовые функции  $W(h)$ :

$$s_i = \sum_{k=1}^N W_i(h_k) C_n^2(h_k) \Delta h_k. \quad (2)$$

При этом индексы мерцаний (как одиночные  $s_i$ , так и взаимные  $s_{ij}$ ) определяются из наблюдений (см. уравнения (3) и (4)), а весовые функции  $W_i(h)$  вычисляются предварительно, исходя из теории распространения волнового фронта Френеля (Tokovinin and Kornilov 2002):

$$s_i = \text{var} \left[ \frac{I_i}{\langle I \rangle} \right], \quad (3)$$

$$s_{i,j} = s_i + s_j - 2\text{cov} \left[ \frac{I_i}{\langle I_i \rangle}, \frac{I_j}{\langle I_j \rangle} \right]. \quad (4)$$

Здесь  $I_i, I_j$  — наблюдаемые фотоотсчеты в апертурах,  $\langle I \rangle, \langle I_i \rangle, \langle I_j \rangle$  — величины, усредненные по времени,  $\text{var}$  — дисперсия ряда случайных величин,  $\text{cov}$  — ковариация двух рядов случайных величин. Прибор MASS имеет четыре кольцевые апертуры, поэтому у него только десять индексов мерцаний: четыре индивидуальных и шесть взаимных. Это позволяет восстановить мощность до десяти турбулентных слоев. С помощью MASS определяется мощность турбулентности на высотах более 500 м. Для нахождения полной мощности турбулентности с учетом ее в приземном слое это устройство применяется вместе с DIMM (прибор MASS–DIMM).

Мы предлагаем использовать для исследования атмосферной турбулентности датчик волнового

фронта Шака–Гартмана (ДШГ), который широко применяется для измерений волновых aberrаций в системах адаптивной оптики, а также при тестировании оптики телескопов (Potanin 2009, Potanin et al. 2017). Датчик представляет собой микролинзовый растр, расположенный в выходном зрачке телескопа. Таким образом, зрачок разделяется на субапертуры. Изображения, построенные каждой субапертурой, регистрируются одновременно. По смещению точек относительно калибровочных положений определяется градиент фазы световой волны на зрачке (значения, усредненные по субапертурам), а также может быть восстановлена амплитуда волны.

В отличие от прибора MASS–DIMM, ДШГ позволяет использовать информацию со всей входной апертуры телескопа, а также независимо и одновременно восстанавливать амплитуду и фазу световой волны на зрачке. Это дает возможность получать информацию как о структурной функции фазы (как, например, в Dayton et al. (1992), Li et al. (1994)), так и о пространственном спектре неоднородностей амплитуды волны на зрачке, связанном с высотным профилем турбулентности (Kovadlo et al. 2021). В работе Shikhovtsev et al. (2021) предложен метод восстановления профилей оптической турбулентности с использованием одного датчика волнового фронта Шака–Гартмана. Показано, что анализ низкочастотных составляющих искажений волновых фронтов на участках апертуры телескопа, соответствующих определенным высотам перекрещивания оптических пучков, дает возможность выявлять турбулентные слои атмосферы и определять энергетические характеристики турбулентности на разных высотах. Последнее можно выполнить, опираясь на конкретную модель турбулентности, а именно на колмогоровскую модель.

Согласно теории у волны на зрачке телескопа (то есть на поверхности Земли) после распространения через турбулентные слои появляются характерные масштабы флуктуаций интенсивности этой волны, соответствующие высотам, на которых есть турбулентное движение. Если принять за основу колмогоровскую модель турбулентности, то спектр таких возмущений можно описать следующим выражением:

$$S(f) = \sum_{k=1}^N 1.53 f^{-11/3} \left[ \frac{\sin(\pi \lambda h_k f^2)}{\lambda} \right]^2 C_n^2(h_k) \Delta h_k. \quad (5)$$

Несколько пространственных мод представлены на рис. 1. Для сравнения на рисунке показан спектр мощности функции зрачка телескопа. Для решения этой задачи чаще всего применяют метод мерцаний, то есть сводят решение к анализу статистических закономерностей временных рядов. Для ДШГ это

выполнено, например, в работе Ogane et al. (2020). Там же приведено сравнение весовых функций для индексов мерцания методов MASS и SH-MASS (Shack–Hartmann–MASS, оригинальное название взято из статьи Ogane et al. (2020)).

Очевидно, что метод восстановления высотного профиля турбулентности по мерцаниям в ДШГ вполне реализуем. Однако возможен и другой подход, а именно разложение пространственного спектра амплитудных возмущений по модам (5) (см. рис. 1). Если ДШГ установлен на телескопе диаметром 0.3 м и имеет субапертуру  $30 \times 30$  мм, то его пространственного разрешения достаточно для того, чтобы восстановить мощность турбулентности на десяти высотах и более. Другой подход, а именно разложение спектра мощности по угловым модам, изложен в работах Guesalaga et al. (2021), Tokovinin (2021). Это методики FASS (Full Aperture Scintillation Sensor) и RINGSS (Ring-Image Next Generation Scintillation Sensor). В FASS используется регистрация изображения зрачка на скоростной камере с низким шумом, а в RINGSS — разложение спектра мощности по угловым модам в одном кольце расфокусированного изображения (см. формулу (5)).

### 3. МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВЫСОТНОГО ПРОФИЛЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

При восстановлении высотного профиля турбулентности мы должны разбить атмосферу на ряд параллельных слоев и считать, что всюду в пределах одного слоя величина  $C_n^2$  постоянна. Это означает, что соответствующие функции для спектра мощности должны быть проинтегрированы по высоте в пределах слоя. Для исследования пространственного спектра амплитудных возмущений и восстановления из него высотного профиля турбулентности мы предлагаем следующий алгоритм:

1. Получаем  $N$  гартманограмм.
2. Из каждой гартманограммы находим распределение амплитуды  $A_i$  и фазы  $F_i$  световой волны на зрачке ( $i = 1, \dots, N$ ). Фаза непосредственно может не восстанавливаться, поскольку в данной задаче нас интересует только ее производная (средние наклоны на субапертурах).
3. Определяем параметр Фрида  $r_0$  по дифференциальным дрожаниям на парных субапертурах:

$$\sigma_i^2 = 2\lambda^2 r_0^{-5/3} [0.179D^{-1/3} - 0.0968d^{-1/3}],$$

$$\sigma_i^2 = 2\lambda^2 r_0^{-5/3} [0.179D^{-1/3} - 0.145d^{-1/3}].$$

Здесь  $D$  — характерный размер субапертуры на зрачке телескопа,  $\sigma_i^2$ ,  $\sigma_i^2$  — дисперсия разности

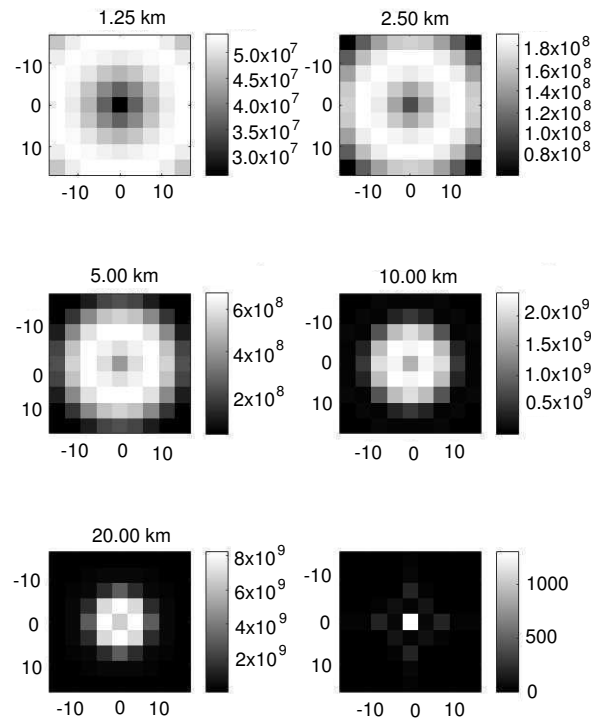


Рис. 1. Пространственные спектры мощности амплитудных возмущений для разных высот, получаемые с датчиком Шака–Гартмана на телескопе диаметром 305 мм и субапертурой  $30 \times 30$  мм. Для сравнения показан спектр мощности зрачка (внизу справа). По осям отложены пространственные частоты в  $1/\text{м}$ .

наклонов фазы в проекции на базу  $d$  и на перпендикуляр к базе соответственно,  $\lambda$  — длина волны. Теоретически можно было бы проделать такую операцию со всеми парами субапертур ДШГ и усреднить результат для  $r_0$ . Однако вполне достаточно ограничиться несколькими десятками пар субапертур.

4. Зная  $r_0$ , находим полную мощность турбулентности ( $J_0 = \int_0^{H_{\max}} C_n^2(h) dh$ ) из выражения (1), а также оцениваем качество изображения  $\beta$ :  $\beta = 0.98\lambda/r_0$ .

5. Определяем среднее значение из всего ряда амплитуд волны  $Am$  и нормировать его так, чтобы среднее значение равнялось 1, вычисляем апертурную маску  $Ms = Am > level$ , где  $level$  — доля от максимального значения, выше которой отсчет считается значимым (в своих модельных расчетах мы брали  $level = 0.1$ ). Таким образом, маска  $Ms$  содержит нули там, где средняя амплитуда не превышает порогового значения, и единицы — там, где превышает.

6. Для каждого кадра вычисляем простран-

ственный спектр мощности амплитудных возмущений:  $S_i = |FFT2((A_i - At_i)Ms/Am)|^2$ , где  $At_i$  — среднее значение амплитуды по апертуре на  $i$ -м кадре,  $FFT2$  — быстрое двумерное преобразование Фурье (БПФ). При использовании стандартных алгоритмов БПФ спектр необходимо нормировать домножением на квадрат шага по пространственной частоте. Поскольку величины в выражениях являются матрицами, то подразумеваются поэлементные операции умножения и деления.

7. Вычисляем средний спектр мощности амплитудных флуктуаций  $Sm$ .

8. Задаем фиксированный набор из  $n$  высот, для которых будет восстанавливаться профиль турбулентности  $h_k$  ( $k = 1, \dots, n$ ) в метрах.

9. Задаем пространственные частоты ( $f_x, f_y$ ) исходя из размерности массива с амплитудами и размера субапертур ШГ. Считаем круговую частоту  $f$ .

10. Вычисляем спектр мощности функции зрачка  $F_0 = |FFT2(Ms)|^2$ , а затем матричные моды Френеля из выражения (5). (Они должны быть проинтегрированы по высотному бину и по длине волны в пределах спектральной полосы пропускания прибора). Затем с каждой модой производим операцию свертки с  $F_0$  с учетом нормировки. Получаем набор спектральных мод  $M_k$ , которые показаны на рис. 1.

11. Далее представляем модельный спектр в виде  $Sc = \sum_{k=1}^n M_k J_k$ , где  $J_k = C_n^2(h_k) \Delta h_k$ . При этом надо помнить о вкладе различных шумов в спектр мощности. Мы предлагаем учитывать спектр шума введением в алгоритм восстановления дополнительного слоя на высоте ниже пороговой чувствительности прибора. В мощность этого слоя войдут как пуассоновский шум сигнала, так и шумы детектора и остаточные мерцания от низких слоев. В дальнейших действиях мощность этого слоя просто не учитывается.

12. Производим оптимизацию функционала  $L_2(Sm - Sc)$  и находим  $J_k$  и  $J_{noise}$ . Если нормировки выполнены правильно, то величина  $J = \sum_{k=1}^n J_k$  есть полная мощность оптической турбулентности для диапазона высот  $[h_1, \dots, h_n]$ . Соответственно, если  $h_n = H_{max}$ , то величина  $J_{ground} = J_0 - J$  есть суммарная мощность оптической турбулентности в диапазоне высот  $[0; h_1]$  (приземный слой). Предельная высота  $h_1$  и разбиение по высотам определяются из численного моделирования (см. ниже).

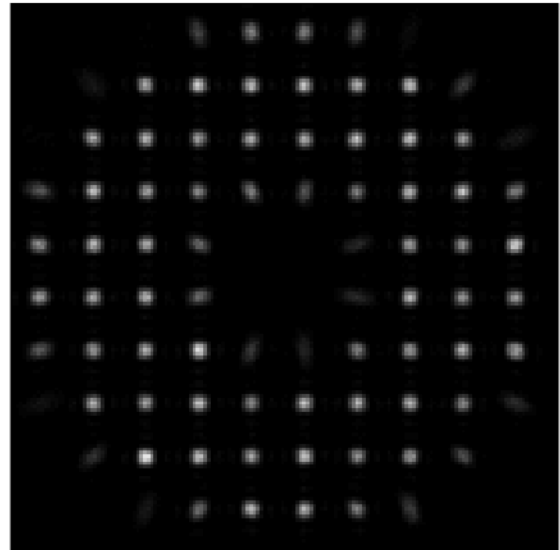
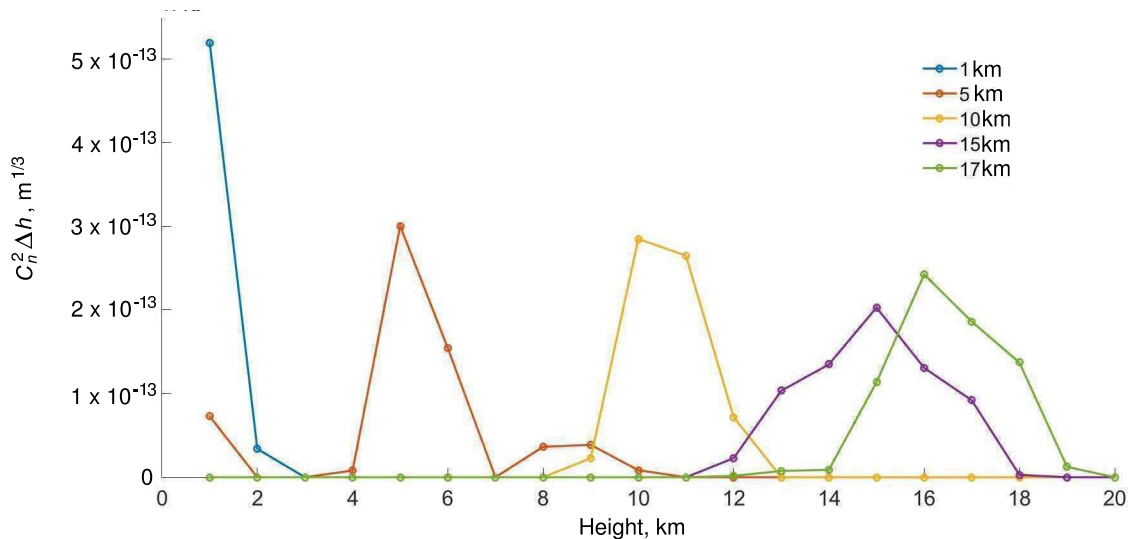


Рис. 2. Модельное изображение гартманнограммы с небольшими возмущениями амплитуды и фазы на телескопе диаметром 30 см и субапертурой  $30 \times 30$  мм.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для проверки возможности определения высотного профиля оптической турбулентности был выполнен ряд численных экспериментов, суть которых состояла в создании фазовых экранов на различных высотах с последовательным распространением через них изначально невозмущенного волнового фронта до поверхности Земли. Далее искаженный фронт разбивался на субапертуры (внутри апертурной маски телескопа), и следовал расчет БПФ для получения изображений модельных гартманнограмм. К изображению можно было добавлять различные шумы, такие как фотонный шум и шум считывания детектора. Пример такого изображения гартманнограммы показан на рис. 2. Затем по этим изображениям выполнялись процедуры, описанные в разделе 3. Моделирование проводилось для оценки разрешения метода по высоте и зависимости точности определения высотного профиля оптической турбулентности от высоты.

Моделирование показало, что описанный алгоритм дает не совсем корректную оценку мощности турбулентности для относительно высоких (выше 10 км) слоев атмосферы. Дело в том, что вариации амплитуды световых волн от таких слоев значительны и плохо усредняются. В результате при нахождении апертурной функции усреднением остаются низкочастотные вариации амплитуды, приводящие к завышению мощности высоких слоев турбулентности. Поэтому для успешного восстановления высотного профиля при определении величины  $(A_i - At_i)Ms/Am$  нужно опираться не на апертурную функцию, полученную усреднением

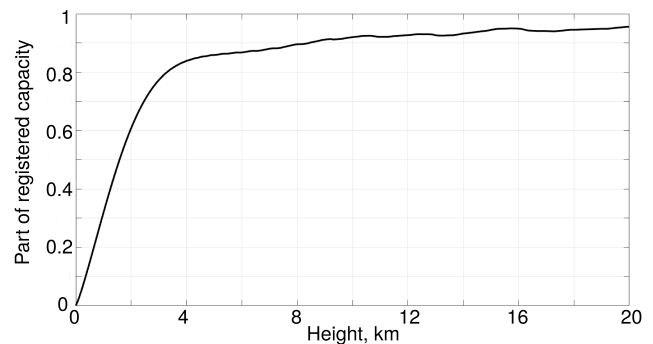


**Рис. 3.** Пример восстановления единичных слоев на высотах 1, 5, 10, 15 и 17 км. Восстановление производилось по ряду из 2000 гартманогрaмм с равномерным шагом по высоте 1 км (в 20 слоях от 1 до 20 км). В модели учтена спектральная полоса пропускания фильтра (500–600 нм).

конкретного ряда, а на среднее значение гораздо большего количества данных. Вплоть до того, что апертурная функция должна вычисляться периодически (раз в несколько дней) с помощью специальной процедуры и храниться в виде нормированного на единицу массива  $A_0$ . Периодически обновлять этот массив необходимо ввиду возможного загрязнения апертуры и оптического тракта прибора.

Мы моделировали ситуацию для различных некоррелированных по времени фазовых экранов на разных высотах. Диапазон длин волн брался 500–600 нм, что соответствует реальному фильтру, который планируется использовать в приборе (см. раздел 6). Сначала был сделан ряд моделей для пяти одиночных слоев на различных высотах от 1 до 20 км для изображений  $\beta = 1''$  и затем с помощью описанного в разделе 3 алгоритма (с учетом замечаний в данном разделе) был восстановлен высотный профиль турбулентности с равномерным шагом по высоте в 1 км. Результат показан на рис. 3. Мы восстанавливали профиль по 2000 некоррелированным реализациям гартманогрaмм. В реальном приборе для получения такого количества кадров необходимо время от 10 с до 20 с (в зависимости от скорости работы камеры). Число фотонов в изображениях соответствовало наблюдениям звезды  $2^m$  в полосе  $V$  с временем экспозиции 1 мс. Таким образом, мы получаем теоретическое разрешение метода по высоте. Разрешение с высотой падает, поэтому можно при восстановлении делать неравномерный шаг по высоте (так же, как в MASS).

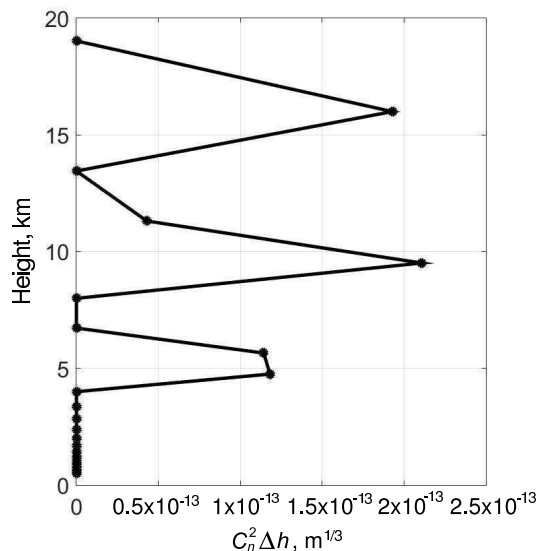
Поскольку в ДШГ происходит существенная дискретизация фронта, имеется выраженный срез



**Рис. 4.** Потери на дискретизации в ДШГ. Расчет для длины волны 500 нм и размера субапертуры  $30 \times 30$  мм.

пространственных частот в спектре амплитуды. По теореме Котельникова резкий завал чувствительности должен произойти на периодах в две субапертуры. В нашем случае это 60 мм. Пространственный период 60 мм соответствует распространению фронта от слоев, находящихся на высоте около 1.4 км. В действительности отдельные моды занимают весь частотный диапазон, поэтому надо оценивать отношение регистрируемой мощности (с учетом дискретизации и обрезки частот) к полной мощности френелевской моды для данной высоты. Поскольку аналитическое выражение (5) не интегрируется по частоте, расчет был выполнен численно для длины волны 500 нм. Результат показан на рис. 4. При восстановлении полученные мощности слоев должны быть скорректированы с учетом этой зависимости.

На рис. 5 показан пример восстановления модельного профиля турбулентности. Было задано



**Рис. 5.** Пример восстановления модельного профиля для  $\beta = 1''$  в трех тонких слоях с одинаковой мощностью (5, 10, 15 км). Восстановление производилось с логарифмическим шагом по высоте.

три тонких слоя на высотах 5, 10 и 15 км с суммарной мощностью, соответствующей размеру атмосферных изображений в  $1''$ . Восстановление велось по 2000 случайным реализациям распространения фронта через эти слои. Шаг по высоте логарифмический. Видно, что алгоритм дает неплохое восстановление исходного профиля.

## 5. ПРОЕКТ АСТРОКЛИМАТИЧЕСКОГО ПОСТА

Астроклиматический пост — это быстровозводимое сооружение. Из подготовительных работ на месте его установки особо важны только три аспекта:

- подготовка площадки и колонны для установки монтировки телескопа и купола;
- подведение электропитания;
- наличие подключения к Интернету.

Телескоп с ДШГ необходимо устанавливать на некотором расстоянии над поверхностью земли. Этот параметр должен быть близок к высоте установки основного телескопа обсерватории (обычно выбирается значение точки пересечения осей высоты и азимута).

По аналогии с уже введенными в эксплуатацию роботизированными телескопами предлагаемый нами астроклиматический пост состоит из трех основных модулей:

- #1 — телескоп с научным оборудованием в куполе;
- #2 — метеомодуль;
- #3 — модуль управления.

Модуль #1 включает в себя:

- телескоп GSO (Guan Sheng Optical) с апертурой 305 мм и фокальным отношением  $f/8$ , в стабильном углепластиковом корпусе, обладающий хорошим качеством изображения;
- электромеханический фокусер ZWO EAF с ASCOM-интерфейсом;
- экваториальную монтировку с абсолютными энкодерами по обоим осям IOptron CEM120EC, позволяющую работать в роботизированном режиме;
- автоматизированный купол AstroKupol AK-2.15 м с ASCOM-интерфейсом;
- промышленный компьютер и необходимое сетевое оборудование.

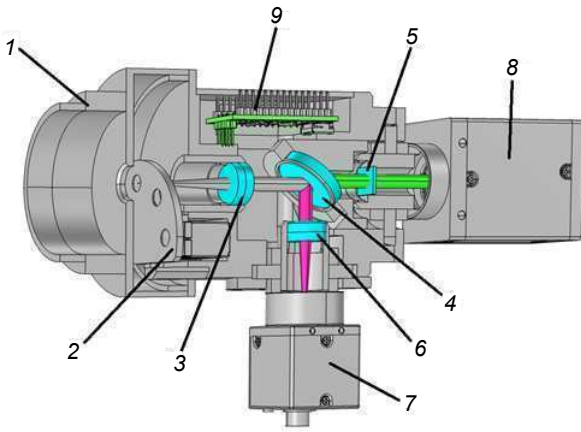
Телескоп будет установлен на колонне, механически развязанной от опоры купола. Доступ персонала в купол осуществляется по наружной лестнице. Внешний вид и подробное описание купола доступны по ссылке <http://astrokupol.ru/product/astronomicheskij-kupol-ak-2-15-automatic-na-czilindre/>.

Модуль #2 устанавливается на отдельно стоящей мачте на расстоянии 10–20 м от купола для исключения ветрового экранирования. В состав метеомодуля входит следующее оборудование:

- метеостанция DAVIS Instruments Vantage Pro2 6152CEU с USB интерфейсом;
- датчик дождя и облачности AAG Cloudwatcher;
- all-sky камера Starlight Oculus 180°;
- герметичный корпус, источники питания, модули грозозащиты и интерфейсные модули.

Модуль #3 собран в специальном всепогодном шкафу и содержит следующие основные компоненты:

- источник бесперебойного питания для всех модулей;
- сервер RMatric-R231-v2 с дисковым массивом;
- устройство удаленного управления электропитанием по сети Ethernet/Internet (IP PDU) NetPing 8/PWR-220 v4/SMS;
- модули грозозащиты цепей электропитания и Ethernet;
- Wi-Fi-роутер для организации сетевой инфраструктуры.

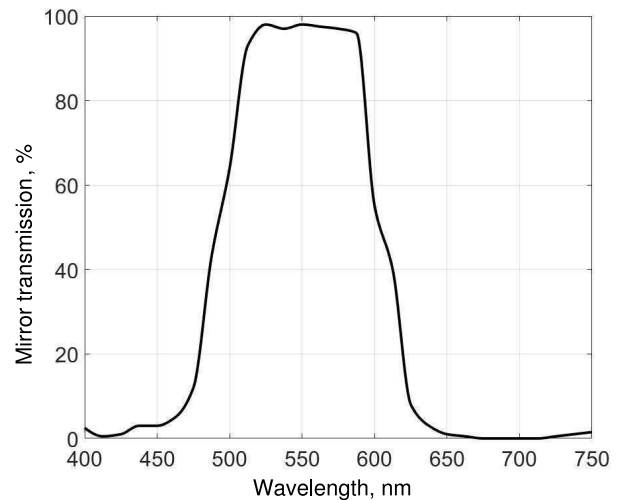


**Рис. 6.** Принципиальная схема датчика Шака–Гартмана: 1 — адаптер для установки на телескоп, 2 — сменные диафрагмы (подзор, диафрагма поля, затвор), 3 — линза коллиматора, 4 — дихроичное зеркало, 5 — микролинзовый растр, 6 — объектив подзора, 7 — камера подзора, 8 — камера для регистрации гартманограмм, 9 — контроллер управления сервоприводом для смены диафрагм. Показан только осевой пучок.

В ИНАСАН безаварийно эксплуатируются уже несколько аналогичных метеомодулей и модулей управления, в том числе в тропическом климате.

## 6. ПРОЕКТ ДАТЧИКА ШАКА–ГАРТМАНА

Для датчика волнового фронта предлагается использовать классическую схему. Обычно в датчиках волнового фронта применяется лазерная калибровка с опорным фронтом. В нашем случае такая процедура не нужна, поскольку задача состоит в измерении колебаний положения точек относительно среднего положения. Принципиальная схема прибора показана на рис. 6. В фокальной плоскости телескопа находятся 2 ряд переключаемых диафрагм: 1) диафрагма для подзора с полем зрения 5"; 2) диафрагма для рабочих наблюдений гартманограмм (20"), и затвор, который необходим для получения темновых кадров (2). Далее расположена линза коллиматора 3 (ахроматический дублет с фокусным расстоянием 40 мм), дихроичный светоделитель 4 (кривая пропускания показана на рис. 7), который пропускает излучение в полосе длин волн, необходимой для работы прибора, а остальной диапазон отражается в подзор, состоящий из линзы 6 (ахроматический дублет) и подзорной камеры 7. Прошедший через дихроик свет попадает на микролинзовый растр 5 (серийный Edmund Optics #15–815) расположенный в выходном зрачке. В фокусе микролинз установлена камера 8. При использовании оптики телескопа  $F/8$  диаметр выходного зрачка составляет 5 мм.



**Рис. 7.** Кривая пропускания дихроичного зеркала в неполяризованном свете.

Микролинзовый растр имеет период 0.5 мм и фокусное расстояние 32.8 мм. Таким образом, зрачок делится на 10 субапертур по диаметру. Поскольку планируется применять телескоп диаметром 305 мм, размер субапертуры составляет  $3 \times 3$  см. При указанных параметрах телескопа ожидаемое поле зрения в подзоре составит не менее 5", что достаточно для наведения. Кроме того, в подзор будет постоянно наблюдаться звезда, что дает возможность осуществлять автоматическое гидирование и контроль низкочастотных колебаний звезды в фокальной плоскости телескопа.

В качестве основного приемника для регистрации гартманограмм будет использована ПЗС-камера Ximea MD028MU-SY с сенсором Sony ICX674. На камере возможно аппаратное бинирование, что повысит частоту кадров и понизит влияние шума считывания. Кроме указанной камеры для проекта закуплены еще две камеры с CMOS- и CCD-сенсорами и характеристиками, близкими к параметрам основного приемника излучения. В процессе тестов будет установлено, какая из них лучше подходит для выполнения такого рода наблюдений. Для повышения отношения  $S/N$  можно использовать микролинзовый растр с меньшим фокусным расстоянием.

## 7. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Для задачи накопления репрезентативного объема данных об астроклиматических особенностях места наблюдения стандартом де-факто является выполнение массовых роботизированных наземных астрономических наблюдений. Для них важное

значение имеет архитектура программного обеспечения и программ управления. В последние десятилетия стало очевидным, что эффективно решить подобную задачу можно применяя архитектуры распределенных гетерогенных систем.

Так, программное обеспечение комплекса для исследования параметров атмосферы может состоять из следующего набора слабо связанных независимых компонентов, возможно, реализованных с использованием различных языков программирования и находящихся на различных краевых устройствах и обменивающихся сообщениями с использованием локальной вычислительной сети:

- программа-планировщик верхнего уровня, обеспечивающая непрерывный ряд автоматических наблюдений звезд из каталога объектов для MASS-DIMM и взаимодействие всех подсистем в зависимости от внешних метеоусловий;
- программа управления метеостанцией, датчиком дождя и облачности;
- программа управления камерой всего неба;
- программа управления телескопом, фокусером и автоматизированным укрытием телескопа (куполом);
- программа управления прибором на основе датчика Шака–Гартмана;
- система управления электропитанием;
- система хранения и обработки данных в реальном времени с пользовательским веб-интерфейсом.

Управление телескопом, куполом, фокусером и другим стандартным астрономическим оборудованием осуществляется на базе платформ ASCOM/INDI, управление электропитанием — по сетевому протоколу SNMP. Подобные архитектуры широко применяются как в проектах астроклиматических измерений, так и в проектах малых роботизированных телескопов, направленных на исследования оптических транзиентов, астероидов и т.п.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предлагается проект универсального астроклиматического поста, который будет реализован для исследования астроклимата на Майданакской обсерватории Узбекистана, Терскольской обсерватории ИНАСАН, а также на предполагаемом месте строительства астрономической обсерватории Национального космического центра Вьетнама. Также планируется проводить калибровочные измерения на Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ (Shatsky et al. 2020), где расположен работающий астроклиматический

пост с прибором MASS–DIMM. Планируется тестирование описанного в статье метода восстановления высотного профиля оптической турбулентности по спектру мощности амплитудных возмущений на зрачке телескопа. Если при реализации на практике мы столкнемся с непреодолимыми трудностями, то сможем использовать известный и реализованный (в том числе и для ДШГ) метод мерцаний.

Комплексные исследования астроклимата, таким образом, охватывают следующие характеристики места:

- 1) метеоусловия (температура, давление, влажность, осадки, направление и скорость ветра);
- 2) фон неба;
- 3) количество ночного ясного времени;
- 4) качество атмосферных изображений;
- 5) высотный профиль оптической турбулентности.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны коллективу ООО «Компания АЗИМУТ ФОТОНИКС» за крайне быструю реакцию на обращение и моментальную поставку оптических компонентов ДШГ. Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за ценные замечания.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение No. 075-15-2021-982 от 13 октября 2021 г.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. Chiozzi, H. Sommer, M. Sarazin, et al., SPIE Conf. Proc. **9913**, id. 991314 (2016).
2. D. Dayton, R. Pierson, B. Spielbusch, and J. Gonglewski, in *Proc. ESO Conference on High-Resolution Imaging by Interferometry II. Ground-Based Interferometry at Visible and Infrared Wavelengths, Garching bei Munchen, Germany, 1991*, Ed. by J. M. Beckers and F. Merkle (Europ. Southern Obs., Garching bei Munchen, 1992), p. 1047.
3. J. M. Delgado, D. Jiménez Mejías, L. F. Rodríguez Ramos, and H. Vázquez Ramió, SPIE Conf. Proc. **7736**, id. 77364U (2010).



4. A. Guesalaga, B. Ayancán, M. Sarazin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **501** (2), 3030 (2021).
5. V. Kornilov, B. Safonov, M. Kornilov, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **126** (939), 482 (2014).
6. V. Kornilov, A. Tokovinin, N. Shatsky, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **382** (343), 1268 (2007).
7. P. G. Kovadlo, A. Y. Shikhovtsev, E. A. Kopylov, et al., *Russian Physics Journal* **63**, 1952 (2021).
8. H. Li, H. Xian, and W. Jiang, in *Proc. ICO-16 Satellite Conference on Active and Adaptive Optics* (Europ. Southern Obs., Garching bei Munchen, 1994), pp. 21–25.
9. H. Ogane, M. Akiyama, S. Oya, and Y. Ono, *SPIE Conf. Proc.* **11448**, id. 114487P (2020).
10. S. A. Potanin, *Astronomy Reports* **53** (8), 703 (2009).
11. S. A. Potanin, I. A. Gorbunov, A. V. Dodin, et al., *Astronomy Reports* **61** (8), 715 (2017).
12. M. Sarazin and F. Roddier, *Astron. and Astrophys.* **227** (1), 294 (1990).
13. N. Shatsky, A. Belinski, A. Dodin, et al., in *Proc. All-Russian Conf. on Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020*, Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev (*Spec. Astrophys. Obs. RAS, Nizhnij Arkhyz, 2020*), pp. 127–132.
14. A. Y. Shikhovtsev, P. G. Kovadlo, A. V. Kiselev, et al., *Atmosphere* **12**, 159 (2021).
15. A. Tokovinin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **502** (1), 794 (2021).
16. A. Tokovinin and V. Kornilov, *ASP Conf. Ser.* **266**, 104 (2002).

### A Facility for the Study of Atmospheric Parameters Based on the Shack–Hartmann Sensor

S. A. Potanin<sup>1,2,3</sup>, M. V. Kornilov<sup>1,2,4</sup>, A. D. Savvin<sup>2</sup>, B. S. Safonov<sup>2</sup>, M. A. Ibragimov<sup>3</sup>,  
E. A. Kopylov<sup>5,3</sup>, M. A. Nalivkin<sup>3</sup>, V. E. Shmagin<sup>3</sup>, L. X. Huy<sup>6</sup>, and N. T. Thao<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

<sup>2</sup>Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

<sup>3</sup>Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

<sup>4</sup>National Research University “Higher School of Economics”, Moscow, 105066, Russia

<sup>5</sup>Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, 634055 Russia

<sup>6</sup>Vietnam National Space Center, Hanoi, 100000 Vietnam

The basic principles of the development of an astroclimatic facility using commercially available standard technical solutions to allow rapid production and unlimited replication are outlined. The facility includes an equatorially-mounted 305 mm,  $F/8$  Ritchey–Chretien telescope with a dome, cloud sensor, and an automatic weather station. The proposed device for studying the parameters of atmospheric turbulence including the altitude profile consists only of a Shack–Hartmann sensor with a  $3 \times 3$  cm subaperture. The feasibility of such an approach has been confirmed by recent studies and our numerical simulations.

Keywords: *atmosphere—atmospheric effects, turbulence—astroclimate*