

УДК 520.16:53.087

МОБИЛЬНЫЙ ДАТЧИК ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ДРОЖАНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АСТРОКЛИМАТА

© 2024 С. А. Потанин^{1,2,3*}, Е. А. Копылов^{4,3}, А. Д. Саввин²

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

²Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

³Институт астрономии Российской академии наук, Москва, 119017 Россия

⁴Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, 634055 Россия

Поступила в редакцию 13 декабря 2023 года; после доработки 13 декабря 2023 года;
принята к публикации 15 декабря 2023 года

Разработан и изготовлен датчик дифференциальных дрожаний астрономических изображений (ДИММ) для исследования параметров оптической турбулентности. Датчик сделан в облегченном экспедиционном варианте и не предполагает использование телескопа, как это всегда делалось ранее. Две апертуры созданы с помощью линз диаметром 70 мм и фокусом 900 мм. Межосевое расстояние апертур составляет 300 мм. Изображения с каждой из апертур строятся в плоскости одной КМОП-камеры, работающей со скоростью до 314 кадров в секунду с низким шумом чтения, около $3e^{-}$. В составе устройства имеется гидирующий телескоп с полем зрения $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ для наведения на звезду. Датчик показал успешную работу в нескольких экспедициях по исследованию астроклимата. Верификация данных датчика была произведена путем сопоставления с измерениями качества атмосферных изображений на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории.

Ключевые слова: *астроклимат; атмосферные изображения*

1. ВВЕДЕНИЕ

Для установки новых астрономических инструментов (телескопов), работающих как в оптической области, так и в субмиллиметровом радиодиапазоне, необходим тщательный выбор места для обсерватории. В результате неверного выбора большая часть наблюдательного времени на инструментах может быть потеряна, например вследствие неподходящих метеоусловий. Также из-за негативного влияния атмосферной турбулентности может быть существенно снижена эффективность телескопа наземного базирования, понимаемая как способность обнаружения слабых астрономических объектов. По этим причинам выбору мест для строительства астрономических обсерваторий уделяется большое внимание. Помимо очевидных параметров, характеризующих локальный астроклимат (количество ясного ночного времени, влажность, ветровой режим, наличие осадков и т.п.), важным является также состояние атмосферы в те часы, когда метеоусловия позволяют выполнять наблюдения.

Для современных систем, позволяющих исправлять в реальном времени атмосферные искажения в астрономических изображениях (адаптивная оптика), необходимо знать интегральную мощность оптической турбулентности и ее распределение по высоте атмосферы. Это крайне серьезная и сложная задача в рамках оптики атмосферы и астроклимата. Ее решение требует глубочайшего анализа как теоретических моделей оптической турбулентности, так и методик получения данных и обработки результатов (Токовин, 2023). Однако для задач первичного отбора перспективных мест для строительства обсерваторий нужны простые переносные приборы, позволяющие работать в экспедиционных условиях. Для начальной характеристики атмосферной турбулентности в оптическом диапазоне длин волн достаточно измерений интегральной мощности турбулентности или просто величины размытия изображений звезды, так называемый размер атмосферных изображений, качество изображений, атмосферная видимость (в англоязычной литературе «seeing»). Для этих целей хорошо подходит прибор Differential Image Motion Monitor (ДИММ), измеряющий дисперсию дифференциальных дрожаний звезды в двух

*E-mail: potanin@sai.msu.ru

небольших субапертурах (Pedersen et al., 1988). Такой прибор в различных модификациях использовался при поиске мест для крупных телескопов Европейской южной обсерватории и до сих пор применяется как для оценки перспективных мест установки телескопов, так и для мониторинга качества изображений на работающих обсерваториях (Sarazin and Roddier, 1990; Polakis, 2022). При постоянном мониторинге качества астрономического видения прибор DIMM является дополнением к измерителям высотного профиля турбулентности (таким, как, например, MASS — Multi-Aperture Scintillation Sensor) для оценки вклада приземного слоя (Kornilov et al., 2014; Chiozzi et al., 2016). Иногда методика дифференциальных дрожаний применяется в приборах нового поколения — мультиапертурных датчиках дрожаний и/или мерцаний (датчики Шака–Гартмана) (Ogane et al., 2020; Kovadlo et al., 2021; Shikhovtsev et al., 2021; Potanin et al., 2022). Также DIMM используется для исследования приземной турбулентности на горизонтальных оптических трассах (Lukin, 2010).

В последнее время активно ведутся работы по анализу астроклиматических параметров, в том числе концентрации водяного пара, по глобальным спутниковым данным и сети наземных метеорологических станций (Iserlohe et al., 2022). Подобные исследования ведутся и в нашей стране. Проводятся как оценки условий на уже действующих астрономических обсерваториях (Bolbasova and Корупов, 2023; Bolbasova et al., 2023), так и поиск новых перспективных мест на территории Российской Федерации (Khaikin et al., 2020, 2022). Недостатком этого метода является низкое географическое пространственное разрешение (50–100 км), что снижает достоверность получаемых данных, в частности, в горных регионах. Поэтому для более детальных исследований ключевых астроклиматических параметров необходимо периодически проводить локальные наземные измерения в местах возможного размещения телескопов с помощью простых и мобильных вариантов приборов. Для измерений интегральной мощности оптической турбулентности на вертикальной трассе лучше всего в таких условиях подходит DIMM.

Принятая всеми оптическая схема DIMM включает в себя телескоп с довольно значительной апертурой (Tokovinin and Kornilov, 2007; Liu et al., 2010; Gracia Témich et al., 2018). Размер апертуры телескопа определяется как сумма базы и размера субапертуры (Kornilov et al., 2007). Как правило, это телескоп не менее 300 мм в диаметре, так как для получения правильных оценок интегральной мощности оптической турбулентности размер базы должен быть более 250 мм, а размер субапертур не менее 30–40 мм (Kornilov and Safonov, 2019). Во

время экспедиционных исследований вся аппаратура должна быть доставлена на предполагаемую точку местности. Часто оборудование приходится нести либо на вьючных животных, либо на себе. Телескоп с диаметром 300 мм даже в облегченном варианте из карбона весит 24 кг. Для такого телескопа нужна мощная монтировка, которая будет весить не менее 30–40 кг. Кроме того, такие приборы имеют существенную стоимость. Это делает их использование невозможным в походных условиях. В стремлении облегчить конструкцию мы пришли к выводу, что можно обойтись вообще без телескопа. Поскольку в реальности от всей апертуры используется лишь два круглых участка диаметром 40–70 мм, то можно заменить телескоп на два ахроматических объектива и системой малых зеркал свести изображения, построенные ими, на одном приемнике.

2. ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКАЯ СХЕМА ДАТЧИКА

Принципиальная оптическая схема датчика дифференциальных дрожаний показана на рис. 1. Схема имеет два симметричных плеча, в каждом из которых расположена ахроматическая линза диаметром 72 мм с фокусным расстоянием 900 мм (1), плоское зеркало диаметром 60 мм в оправе (2), плоское зеркало диаметром 30 мм в оправе (3), общий для обоих каналов светофильтр (4) и камера (5), расположенная на фокусирующем трансляторе. Для одинаковой фокусировки обоих изображений на камере оправы линз выполнены в резьбовых втулках. Это позволяет, вращая одну из оправ, двигать линзу вдоль оптической оси. Все зеркала имеют две степени свободы по наклонам. В практической реализации датчика на оправках линз имеются дополнительные резьбовые посадки для установки бленд и диафрагм на апертуры.

В качестве светофильтра применялся астрономический фильтр V (цветное стекло с интерференционным покрытием), кривая пропускания фильтра показана на рис. 2. Приемником служила промышленная КМОП-камера машинного зрения MV-CA004-10UM (производство КНР). Разрешение камеры 720×540 пикселей, размер пикселя 6.9 мкм, частота кадров 526 кадров в секунду при оцифровке 8 бит и 314 кадров в секунду при оцифровке 12 бит. Коэффициенты преобразования $G [e^-/ADU]$ и шумы считывания $R [e^-]$ в различных режимах были исследованы на специальном лабораторном стенде. В дальнейших наблюдениях всегда использовался режим с оцифровкой 12 бит и частотой кадров 314 кадров в секунду. При этом коэффициент преобразования составлял $G = 2.48 e^-/ADU$ (см. рис. 3), а среднеквадратическое значение шума считывания составляет

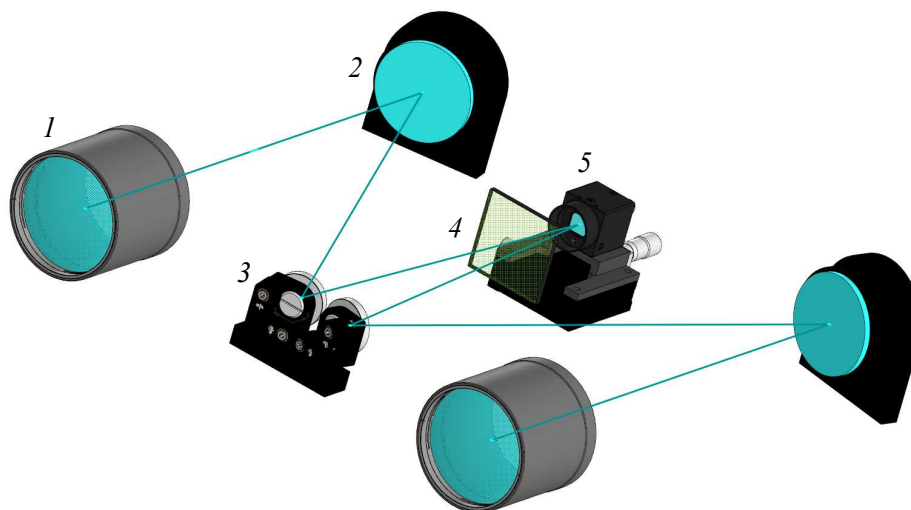


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема мобильного двухлинзового DIMM.

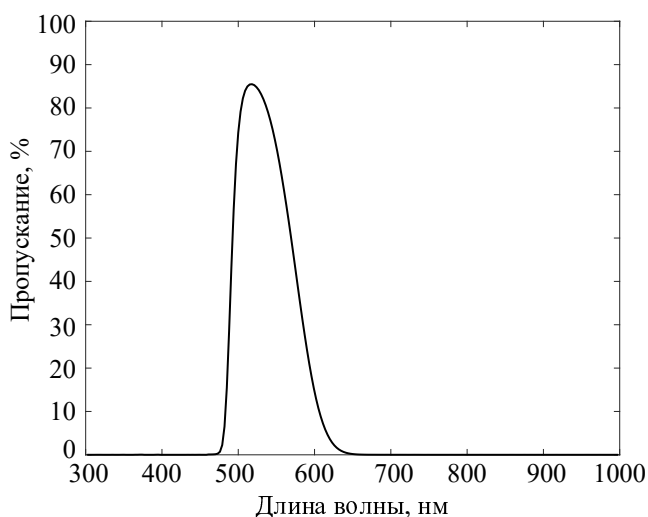


Рис. 2. Кривая абсолютного пропускания светофильтра.

$R = 3.1 e^-$. Эти значения являются средними по всем пикселям приемника. Влияние индивидуальных параметров усилителей КМОП на ошибку определения центра изображения рассмотрены в следующем разделе.

3. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РАЗМЕРОВ АТМОСФЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Методика получения оценок размеров атмосферных изображений из дисперсии дифференциальных дрожаний уже устоялась в мировой практике и хорошо описана, например, в Tokovinin (2002) или Tokovinin and Kornilov (2007). В своих алгоритмах вычислений мы не отходили от стандартных методик, при этом исследовали (и учли) вклад в дисперсию определения координат центроидов шума, связанного со спецификой

КМОП-детекторов (см. ниже). Основные характеристики измерительной системы следующие:

1. Масштаб изображения: $1''/548$ на пиксель (измерен по изображениям двойной звезды).
2. Время экспозиции: 0.003 с.
3. Частота кадров: 314 кадров в секунду.
4. Разрядность оцифровки: 12 бит.
5. Средний коэффициент преобразования: $G = 2.48 e^-/ADU$.
6. Средний шум считывания: $R = 3.1 e^-$.
7. Расстояние между осями апертур (база DIMM): 300.0 мм.
8. Диаметр апертур: 68 мм (с возможностью диафрагмирования до 40 мм).
9. Обобщенная квантовая эффективность прибора: около 35%.

Используемое нами время экспозиции позволяло уверенно проводить наблюдения с объектами 2^m-3^m . Для более ярких объектов время экспозиции нужно уменьшать ввиду заполнения потенциальной ямы в пикселях КМОП. Также можно уменьшить диаметр апертур. При экспозиции 0.003 с и частоте кадров 314 в секунду незадействованное время между кадрами составляет всего 6%, что позволяет пользоваться простой формулой для экстраполяции дисперсии к нулевой экспозиции (учет ветрового смаза). В случае более коротких экспозиций скважность увеличивается и можно применять модифицированную экспоненциальную коррекцию, как описано в Tokovinin and Kornilov (2007).

Измерения производились сериями по 5000 непрерывно следующих друг за другом кадров (суммарное время около 16 с). Из каждого кадра

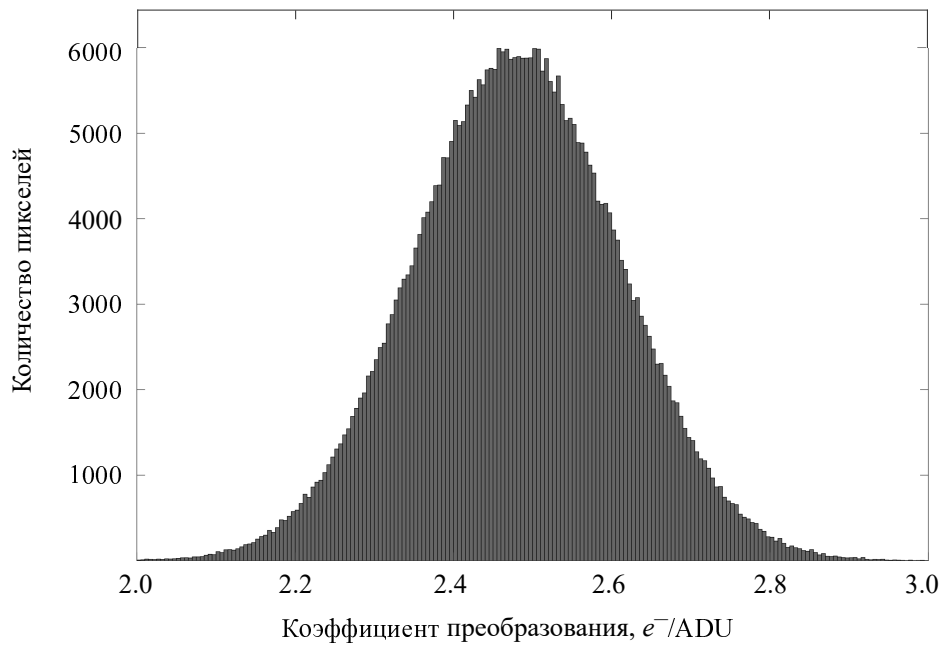


Рис. 3. Распределение значения коэффициента преобразования для камеры DIMM в 12-битном режиме оцифровки.

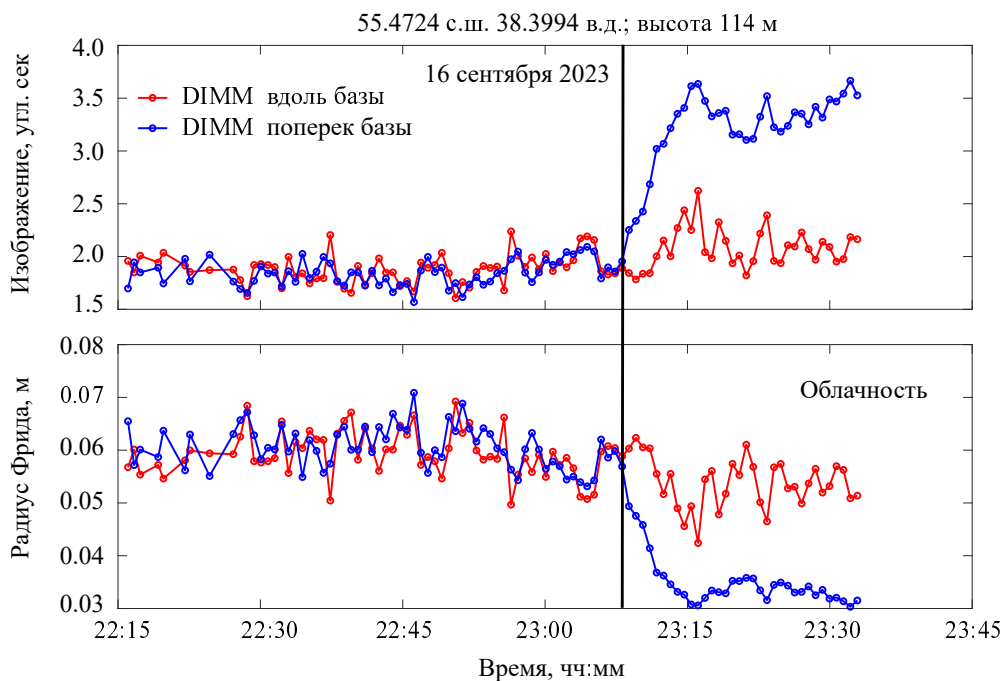


Рис. 4. Пример тестовых измерений с прибором в Московской области. Показано совпадение параметров, измеренных по продольным и поперечным дрожаниям, и их расхождение при появлении облачности и запотевании линз прибора (правая часть графиков за вертикальной чертой). Вверху также указаны географические координаты места, в котором производились измерения.

вычитался усредненный темновой кадр, потоки в пикселях переводились в количество электронов умножением на соответствующие значения коэффициента преобразования, и определялись координаты центроидов. Далее вычислялись дисперсии

разности координат центроидов в проекции на базу и в перпендикулярном направлении, дисперсии, вносимые различными шумами, и определялись значение радиуса Фрида r_0 (Sarazin and Roddier, 1990) и размер атмосферных изображений по фор-

муле $\beta = 0.98\lambda/r_0$, где λ — средняя длина волны фильтра. При аккуратном учете шумов оценки параметра β по продольным и поперечным дифференциальным дрожаниям должны совпадать. На рис. 4 показан пример измерений для продольных и поперечных дифференциальных дрожаний. Определенные по ним значения размеров атмосферных изображений практически совпадают до тех пор, пока внешние условия наблюдений (в виде росы и тумана) не вносят свои коррективы. В дальнейшем мы пользовались средним значением из этих параметров и всегда следили за их совпадением. При этом расхождения могут возникнуть из-за сильных вибраций прибора (например, от сильного порывистого ветра), запотевания линз (особенно неравномерного), облачности или тумана (из-за снижения отношения сигнала к шуму). Упругие деформации и термодформации прибора не являются проблемой, поскольку на масштабах времени около одной минуты дают в разности координат двух центроидов только плавные тренды, которые легко могут быть выявлены и удалены из данных наблюдений.

3.1. Особенности работы с КМОП-детектором

В отличие от ПЗС, где считывание происходит в один или несколько (до четырех) усилителей, в КМОП содержится большое количество усилителей, которые распределены по столбцам и по группам пикселей. В целом можно считать, что значение усиления и шума считывания индивидуально для каждого пикселя. Авторами была измерена карта коэффициента преобразования и шума для всех пикселей. Учет индивидуального усиления после этого не составляет труда. Однако индивидуальные усиления сильно зависят от температуры детектора. Для учета вклада шума усиления было произведено численное моделирование для двух случаев:

1. Влияние на ошибку определения «центра тяжести» изображения в небольшом окне постоянной карты усиления со средним значением $G = 2.5 e^-/ADU$ и различным параметром ширины распределения от 0 до 30% относительно среднего значения.
2. Влияние на ошибку определения «центра тяжести» изображения с теми же значениями параметров, что и в первом эксперименте, но в каждой отдельной реализации карта усиления была случайной.

Первый вариант соответствует регистрации дрожаний изображения в постоянном окне анализа, когда карта усиления остается постоянной, как это и делалось в реальности, второй — измерениям в произвольных окнах, когда карта усиления всегда

разная, но с постоянными средним значением и дисперсией коэффициента усиления. Изображение моделировалось в виде распределения Гаусса с шириной на половине высоты три пикселя со случайным разбросом центра со среднеквадратическим разбросом радиуса один пиксель и полным потоком $2500 e^-$ и фоном $20 e^-$ в окне 10×10 пикселей. В идеальное оцифрованное изображение вносился пуассоновский шум, затем производилось деление на карту усиления и округление до целых значений. Далее осуществлялась операция перевода этого изображения в электроны без учета разности усиления в пикселях, просто путем умножения всего изображения на среднее значение усиления. В полученном изображении определялся центр масс. Для расчета ошибки измерений центра проделывалось 25 000 таких реализаций при каждом значении статистического разброса усиления. В конечном счете определялась зависимость отношения полной ошибки измерения центра тяжести к ошибке определяемой только фотонным шумом от относительного разброса значений коэффициента преобразования. Результат численного эксперимента показан на графике на рис. 5. Реальное распределение коэффициента преобразования представлено на рис. 3. Среднее значение $G = 2.48 e^-/ADU$ и $\delta G = 0.13 e^-/ADU$. Отношение $\delta G/G = 0.052$. По результатам моделирования получается, что вклад в дисперсию определения координат одного центроида $((\delta X)^2 - (\delta X_{\text{poiss}})^2) / (\delta X_{\text{poiss}})^2$ в окне с постоянной картой усиления составляет 4%, а в случае использования окон с различными картами усиления — 17.5%. Здесь $(\delta X)^2$ — полная дисперсия центра масс изображения, а $(\delta X_{\text{poiss}})^2$ — дисперсия центра масс, определяемая только фотонным шумом. При коррекции коэффициента усиления вклад в дисперсию будет давать только временная нестабильность усиления, относительная ошибка которого мала. А значит, в таком случае будет реализован второй вариант (случайные карты усиления), но с гораздо меньшей относительной ошибкой. В действительности точный учет вклада этого эффекта крайне затруднителен, поэтому точность измеренных параметров не может быть лучше 2–5%.

Поскольку у КМОП-матрицы значения шума считывания также индивидуальны для всех пикселей, то процесс бинирования (объединения пикселей) не дает никакого улучшения для отношения сигнала к шуму. Бинирование может существенно сократить объем данных и позволяет снимать более продолжительные непрерывные ряды измерений. Однако стоит помнить, что чрезмерное бинирование может снизить точность определения

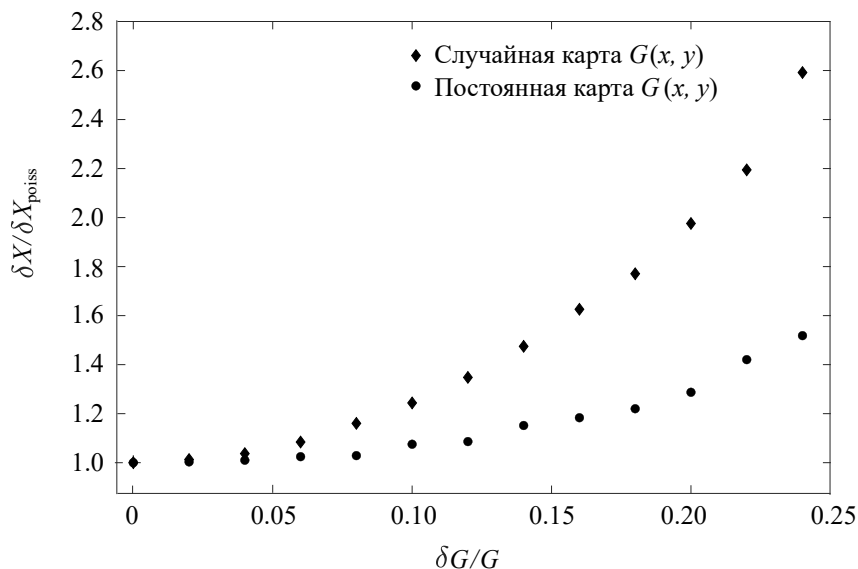


Рис. 5. Увеличение ошибки определения центра (относительно вклада фотонного шума) в зависимости от разброса коэффициента преобразования КМОП. Для случаев работы в случайных окнах (ромбы) и для постоянного окна (кружки).

координат центроидов, поскольку существует минимальное значение ширины профиля на половине высоты, ниже которого начинает сказываться шум пространственной оцифровки. Сами размеры изображений часто бывают больше дифракционных вследствие различных aberrаций. В схеме с двумя линзами — это, в основном, остаточная сферическая aberrация, которая не зависит от угла поля и поэтому не дает систематических погрешностей при определении центров изображений звезд.

4. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ С 2.5-М ТЕЛЕСКОПОМ КГО ГАИШ

Для верификации данных измерений размеров атмосферных изображений, получаемых с нашим прибором, было произведено сравнение с одновременными показаниями спекл-поляриметра (Safonov et al., 2017; Strakhov et al., 2023), установленного на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории МГУ (Shatsky et al., 2020). Телескоп обладает прекрасным качеством оптики (концентрация энергии 80% в круге диаметром 0"3 (Potanin et al., 2017)).

Во время этих совместных наблюдений DIMM находился на крыше пристройки башни 2.5-м телескопа (то есть вне купола) на высоте на 2 м ниже, чем пересечение осей альт-азимутальной монтировки телескопа. Расстояние от оси азимута монтировки до места установки DIMM составляло около 11 м. Наблюдения проводились в ночь с 27 на 28 сентября 2023 г. В начале ночи был сильный туман, который начал рассеиваться к полуночи. При этом относительная влажность держалась на

высоком уровне до 2:30, что не позволяло начать наблюдения на телескопе из-за угрозы запотевания зеркал. Измерения с DIMM начались в 00:30 и продолжались до 04:00. Все это время в DIMM наблюдалась звезда Капелла. Оценки размеров атмосферных изображений делались по рядам кадров продолжительностью 16 с. Спекл-поляриметр (в режиме спекл-интерферометра) начал работу в 2:30. На нем наблюдались различные звезды по наблюдательной программе ГАИШ, а также специально ряд наблюдений был выполнен и для звезды Капелла. Данные в обоих приборах были независимо приведены к зениту и к длине волны 550 нм. Результат сравнения размеров изображений показан на рис. 6. Видно, что оба прибора дают почти идентичные оценки размеров атмосферных изображений.

5. ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ДАТЧИКОМ

Прибор использовался в двух экспедициях по поиску перспективных мест для установки оптических и радиотелескопов:

1. Гора Курапдаг (высота 3750 м над уровнем моря), Самурский хребет, Кавказские горы, Агульский район Республики Дагестан.
2. Плато Юстыд (высота 2100 м над уровнем моря), Алтайские горы, Кош-Агачский район Республики Алтай.

Прибор DIMM использовался с автоматизированной монтировкой EXOS-2/EQ-5. Вид прибора на монтировке показан на рис. 7. Во время наблюдений были выявлены некоторые недостатки

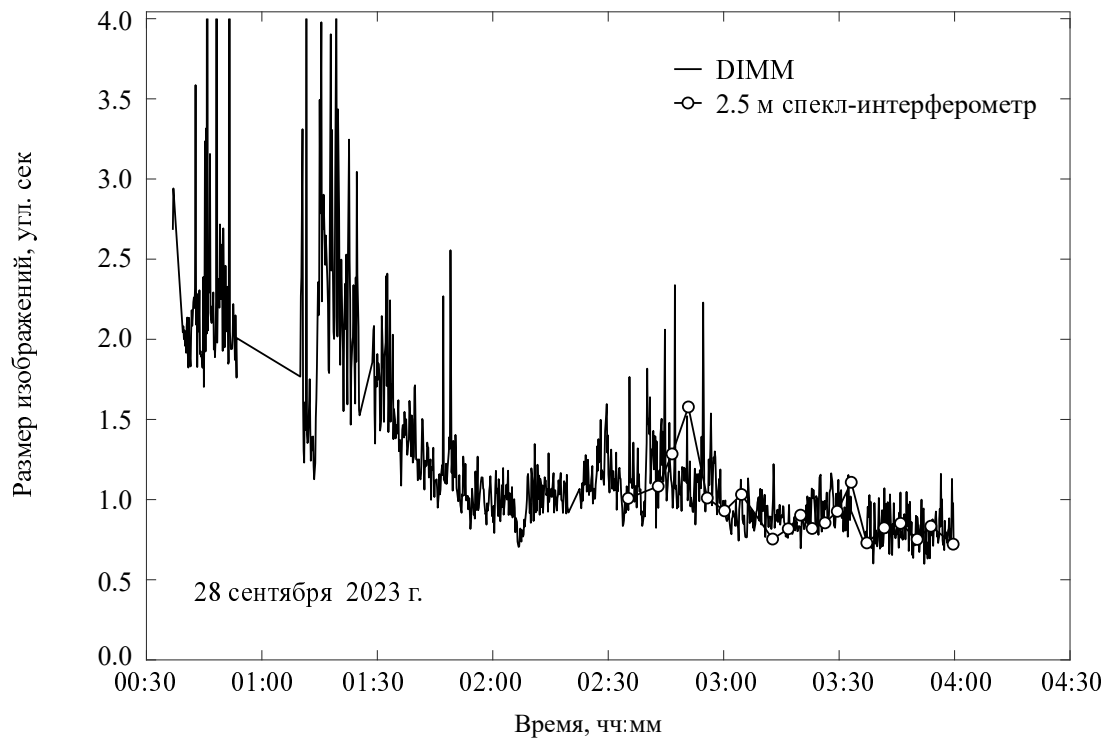


Рис. 6. Сравнение измерений размеров атмосферных изображений, полученных с DIMM (черная кривая) и со спекл-интерферометром на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ (светлые точки).



Рис. 7. Прибор вместе с камерой подсмотра и монтировкой на горе Курапдаг (3700 м), Республика Дагестан.

конструкции, которые будут устранены впоследствии. Например, оказалось, что резкое охлаждение прибора при переносе его из теплого помещения на улицу приводит к термической деформации пары вторичных зеркал и, как следствие, к появлению значительного астигматизма. Для стабилизации оптической схемы при большом перепаде температур нужно значительное время (около 30 минут). Поэтому желательно, чтобы прибор до начала наблюдений находился на улице при температуре наружной окружающей среды. В дальнейшем стеклянные зеркала будут заменены на кварцевые и способ их закрепления в оправе будет исключать термические деформации.

5.1. Наблюдения на горе Курапдаг

Вес готового прибора составил 7.5 кг, а монтировки — 18 кг. Это позволило, хотя и с определенными трудностями, провести измерения на высоте 3540 м (недалеко от вершины горы Курапдаг). Дороги к вершине нет. Подъем оборудования от села Чираг (высота 2300 м) на лошади и частично вручную состоялся 9 июля 2023 года. Погода была облачной, кроме того, был очень сильный порывистый ветер юго-западного направления, в порывах достигающий скорости более 25 м с^{-1} . На вершине горы был установлен GPS-приемник. Вечером 10 июля небо прояснилось и стали видны

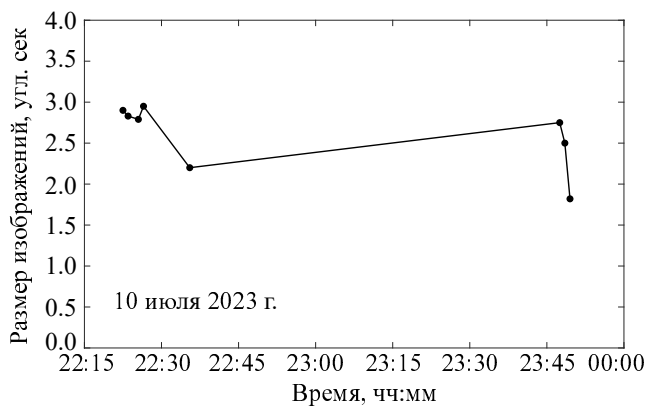


Рис. 8. Результаты измерений размеров атмосферных изображений на горе Курапдаг, Республика Дагестан, 10 июля 2023 г. Место установки прибора: $41^{\circ}47'27''4$ с.ш., $47^{\circ}23'13''3$ в.д. Высота над уровнем моря: 3540 м.

звезды, однако ветер не стихал. Это обстоятельство не позволило провести измерения на вершине. Наблюдения проводились на северном склоне горы с подветренной стороны. Однако и там порывы ветра были очень сильны. Один из порывов даже повалил монтировку. К счастью, прибор в этот момент на ней не был установлен. Электропитание прибора осуществлялось от бензогенератора. Измерения размеров изображений удалось выполнить лишь эпизодически в промежутке времени с 22:20 до 23:45. После появилась облачность и пошел дождь, а на следующий день и снег. Было принято решение завершить измерения и спуститься в с. Чираг. Результаты измерений показаны на рис. 8.

5.2. Наблюдения на плато Юстыд вблизи села Ташанта

Село Ташанта находится в 500 км от столицы Республики Алтай — города Горно-Алтайска, на федеральной трассе Р256 «Чуйский тракт». За счет наличия каменистой ровной поверхности грунта подвоз оборудования может быть осуществлен практически в любую точку плато автотранспортом. Наблюдения проводились в две последовательные ночи, с 27 на 28 и с 28 на 29 октября 2023 г., при температуре воздуха от -10°C до -14°C и скорости ветра $2-5 \text{ м с}^{-1}$. Питание прибора осуществлялось от автомобильного аккумулятора 12 V с инвертором. В первую ночь (27 октября) была переменная облачность, которая полностью пропала только к 4 часам утра. Непрерывный ряд наблюдений размеров атмосферных изображений был получен примерно с 4:10 до 6:00 (местного времени), то есть в течение примерно двух часов. В это время медианное значение качества изображений составило $1'65$, при

этом был зафиксирован период около 10 минут, когда размер изображений приближался к $0'5$, а также периоды выбросов до $\beta > 3''$. В следующую ночь удалось сделать непрерывную, более чем 5-часовую запись, с 22:45 до 04:00. Размер изображений отличался большой стабильностью с медианным значением $2'23$. Синхронно в это время работала акустическая метеостанция «Метео-2» (Gladkih and Makienko, 2009), позволяющая проводить оценку значений структурной функции показателя преломления C_n^2 (Botygina et al., 2013). Метеостанция располагалась на расстоянии 300 м от точки измерения DIMM и на высоте 10 м от поверхности земли. Медианное значение размера изображений, полученное с помощью аналитической модели высотного профиля $C_n^2(h)$ Хафнагеля–Волли, составило $2'17$. Из этого обстоятельства можно сделать вывод, что основная мощность оптической турбулентности была сосредоточена в приземном слое. Сравнение наблюдений DIMM и акустических станций выполнены ранее, например, в работе Lukin et al. (2014).

По результатам наших измерений (см. рис. 9), а также по данным метеостанции и измерениям содержания осаждаемой воды (по задержкам сигналов GPS) было принято решение об установке рядом с поселком Ташанта постоянно действующего астроклиматического поста.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный нами двухлинзовый датчик дифференциальных дрожаний изображений показал свою пригодность для исследований размеров атмосферных изображений в походных условиях. Прибор оказался, по крайней мере, в три раза легче классического прибора DIMM, включающего в себя телескоп. Кроме того, данное устройство обладает гораздо меньшей стоимостью. Прибор был испытан в Москве и Подмосковье, а также использовался и будет использоваться далее для исследования астроклимата на территории Российской Федерации в местах, считающихся перспективными для установки в них крупных российских оптических и радиотелескопов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны жителям села Чираг Агульского района республики Дагестан Гаджиеву Магомед-Гаджи Магоримовичу и Курванову Мурадугу Магметовичу за содействие при проведении полевых работ. Авторы благодарны директору МКОУ «Чирагская средняя общеобразовательная

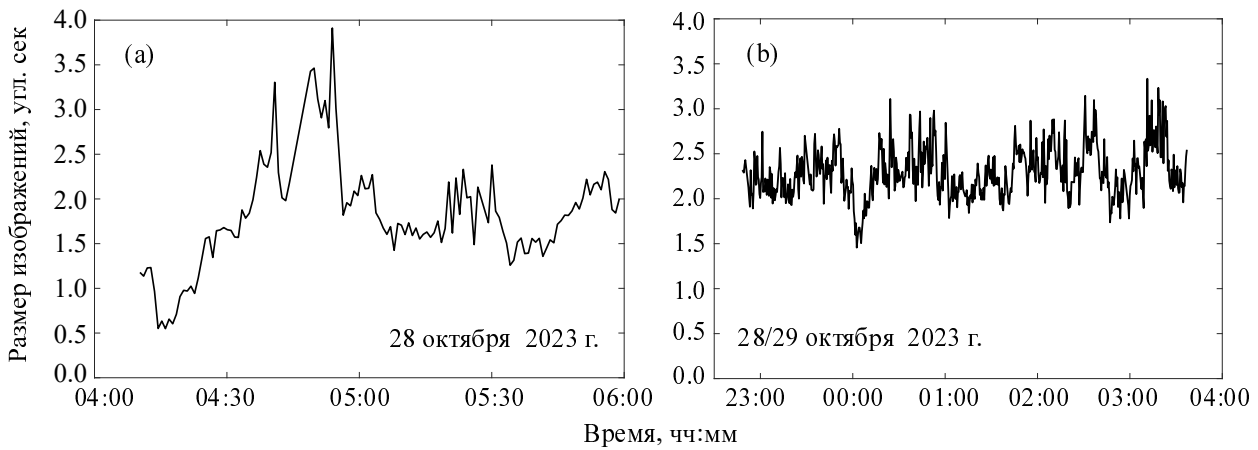


Рис. 9. Результаты измерений около поселка Ташанта. Панель (а) — ночь с 27 на 28 октября 2023 г., панель (б) — с 28 на 29 октября 2023 г. Место установки прибора: $49^{\circ}43'20.5''$ с.ш., $89^{\circ}11'8''58$ в.д. Высота над уровнем моря: 2050 м.

школа» Гамзатову Рамазану Магомедовичу, директору МКОУ «Ташантинская основная общеобразовательная школа» Едильбаеву Елдару Байбахытовичу. Авторы также благодарят заведующего лабораторией новых фотометрических методов ГАИШ МГУ Сафонова Бориса Сергеевича за совместные наблюдения на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ, инженера Кавказской горной обсерватории Сеника Виктора Алексеевича за помощь при наладке оборудования, научного сотрудника ГАИШ Горбунова Игоря Андреевича за помощь при изготовлении деталей прибора.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-00041.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. A. Bolbasova and E. A. Kopylov, *Atmosphere* **14** (8), id. 1264 (2023). DOI:10.3390/atmos14081264
2. L. A. Bolbasova, A. Y. Shikhovtsev, and S. A. Ermakov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **520** (3), 4336 (2023). DOI:10.1093/mnras/stad300
3. N. N. Botygina, P. G. Kovadlo, E. A. Kopylov, et al., *Atmospheric and Oceanic Optics* **26** (11), 942 (2013).
4. G. Chiozzi, H. Sommer, M. Sarazin, et al., *SPIE Conf. Proc.* **9913**, id. 991314 (2016). DOI:10.1117/12.2232302
5. V. A. Gladkih and A. E. Makienko, *Pribory* **109** (7), 21 (2009).
6. F. Gracia Témich, J. L. Rasilla, and J. M. Delgado Hernández, *SPIE Conf. Proc.* **10706**, id. 107064V (2018). DOI:10.1117/12.2314595
7. C. Iserlohe, W. D. Vacca, C. Fischer, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **134** (1038), id. 085001 (2022). DOI:10.1088/1538-3873/ac82c5
8. V. Khaikin, M. Lebedev, V. Shmagin, et al., in *Proc. on 7th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russia, 2020*, (JRE RAS, Moscow, Russia), pp. 47–51 (2020). DOI:10.1109/RMC50626.2020.9312233
9. V. B. Khaikin, A. Y. Shikhovtsev, A. P. Mironov et al., in *Proc. Conf. on Multifaceted Universe: Theory and Observations-2022, Nizhny Arkhyz, Spec. Astrophys. Obs. RAS, Russia, 2022*, id. 72 (online at <https://pos.sissa.it/425/072/>). DOI:10.22323/1.425.0072
10. V. Kornilov and B. Safonov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **488** (1), 1273 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz1783
11. V. Kornilov, B. Safonov, M. Kornilov, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **126** (939), 482 (2014). DOI:10.1086/676648
12. V. Kornilov, A. Tokovinin, N. Shatsky, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **382** (343), 1268 (2007). DOI:10.1111/j.1365-2966.2007.12467.x
13. P. G. Kovadlo, A. Y. Shikhovtsev, E. A. Kopylov, et al., *Russian Physics Journal* **63** (11), 1952 (2021). DOI:10.1007/s11182-021-02256-y
14. L.-Y. Liu, Y.-Q. Yao, Y.-P. Wang, et al., *Research in Astronomy and Astrophysics* **10** (10), 1061 (2010). DOI:10.1088/1674-4527/10/10/009
15. V. Lukin, *Photonics Russia* **5**, 16 (2010).
16. V. P. Lukin, N. N. Botygina, V. A. Gladkih, et al., *SPIE Conf. Proc.* **9292**, id. 929221 (2014). DOI:10.1117/12.2075696
17. H. Ogane, M. Akiyama, S. Oya, and Y. Ono, *SPIE Conf. Proc.* **11448**, id. 114487P (2020). DOI:10.1117/12.2562320

18. H. Pedersen, F. Rigaut, and M. Sarazin, *The Messenger* **53**, 8 (1988).
19. T. Polakis, in *Proc. on 41st Annual Conf. Soc. for Astron. Sciences (SAS-2022), Ontario, Canada, 2022*, Ed. by J. C. Martin, R. K. Buchheim, R. M. Gill, W. Green, and J. Menke (Society for Astronomical Sciences, Inc. CA, 2022), pp. 93–98 (2022).
20. S. A. Potanin, I. A. Gorbunov, A. V. Dodin, et al., *Astronomy Reports* **61** (8), 715 (2017). DOI:10.1134/S106377291707006X
21. S. A. Potanin, M. V. Kornilov, A. D. Savvin, et al., *Astrophysical Bulletin* **77**, 214 (2022). DOI:10.1134/S1990341322020067
22. B. S. Safonov, P. A. Lysenko, and A. V. Dodin, *Astronomy Letters* **43** (5), 344 (2017). DOI:10.1134/S1063773717050036
23. M. Sarazin and F. Roddier, *Astron. and Astrophys.* **227** (1), 294 (1990).
24. 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. DOI:10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_127
25. A. Y. Shikhovtsev, P. G. Kovadlo, A. V. Kiselev, et al., *Atmosphere* **12**, 159 (2021). DOI:10.3390/atmos12020159
26. I. A. Strakhov, B. S. Safonov, and D. V. Cheryasov, *Astrophysical Bulletin* **78** (2), 234 (2023). DOI:10.1134/S1990341323020104
27. A. Tokovinin, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **114** (800), 1156 (2002). DOI:10.1086/342683
28. A. Tokovinin, *Atmosphere* **14** (11), id. 1694 (2023). DOI:10.3390/atmos14111694
29. A. Tokovinin and V. Kornilov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **381** (3), 1179 (2007). DOI:10.1111/j.1365-2966.2007.12307.x

Mobile Differential Image Motion Monitor for Astroclimate Research

S. A. Potanin^{1,2,3}, E. A. Kopylov^{4,3}, and A. D. Savvin²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

²Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

³Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

⁴Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, 634055 Russia

A differential image motion monitor (DIMM) has been developed and manufactured to study atmospheric seeing. The monitor is made in a lightweight field version and can operate without a telescope, as has always been the case before. Two apertures are made using 70-mm lenses with a focal distance of 900 mm. The distance between the aperture axes is 300 mm. The images from the apertures are combined in the plane of a single CMOS camera operating at up to 314 frames per second speed with low reading noise of about $3e^-$. The device also includes a $3^\circ \times 3^\circ$ field of view viewer for pointing at a star. The monitor proved to work successfully during several astroclimate study expeditions. The monitor data were verified by comparing them with the results of atmospheric seeing measurements at the 2.5 meter telescope of the Caucasian Mountain Observatory.

Keywords: *astroclimate: atmospheric images*