

Исследование атмосферной оптической турбулентности с целью разработки и использования методов высокого углового разрешения

Реферат

Наземные телескопы имеют, как правило, больший размер апертуры и, следовательно, потенциально более высокое угловое разрешение, чем космические. Однако реализация этого потенциала зависит от возможности преодоления возмущающего влияния атмосферной оптической турбулентности. В рамках данной темы мы выполняем разработку и применение методов измерения параметров атмосферной оптической турбулентности. Также мы развиваем методы преодоления возмущающего действия атмосферы, как пассивные, основанные на анализе искаженных изображений пост-фактум, так и активные, предполагающие измерение и исправление искажений в реальном времени (адаптивная оптика).

В 2023 году, совместно с ИНАСАН были продолжены работы по астроклиматическим исследованиям в перспективных для установки новых крупных телескопов пунктах, расположенных на территории РФ. Так, был изготовлен и опробован в полевых условиях датчик дифференциальных дрожаний новой конструкции. Произведены тестовые наблюдения с датчиком дифференциальных дрожаний в ряде пунктов: в Кавказской Горной Обсерватории ГАИШ МГУ, а также в двух перспективных пунктах: г. Курапдаг, пос. Ташанта. Установлены метеостанции, GPS-станции и акустические измерители атмосферной турбулентности для мониторинга на постоянной основе на г. Курапдаг и в пос. Ташанта.

В 2023 году продолжены регулярные наблюдения на астроклиматическом посту КГО ГАИШ МГУ. Получено 1109 часов измерений, что примерно соответствует общему количеству ясного времени на месте установки 2.5-м телескопа КГО. Медианное качество изображения составило 1.16 секунд дуги. Проводилась разработка экспресс-методов обработки измерений с Domesat - прибором для измерения мощности подкупольной турбулентности.

Продолжались наблюдения на 2.5-м телескопе с модернизированной версией спекл-поляриметра - прибора для достижения дифракционного разрешения методами спекл-интерферометрии и дифференциальной спекл-поляриметрии. Суммарное время накопления составило 99.4 ч, результаты полученные в 2023 году и ранее были использованы в 17 статьях в рецензируемых журналах, вышедших в печати в 2023 году. Выполнялась отработка методики спекл-интерферометрии: уточнение астрометрических измерений, учет некоторых эффектов, характерных для CMOS детектора, снижение накладных расходов при наблюдениях.

Введение

В эру космических телескопов наземные оптические обсерватории сохраняют актуальность. Действительно, при аналогичных затратах, наземный телескоп имеет в несколько раз больший размер апертуры чем космический, вследствие чего наземные телескопы значительно обгоняют космические, к примеру, по угловому разрешению. Кроме того, в отличие от космических телескопов, оборудование наземных телескопов можно легко модернизировать. Эти и множество других факторов позволяют

предполагать что еще значительное время наземные телескопы будут конкурировать на равных с космическими, и дополнять их функциональность.

Специфика наземного телескопа заключается в том что его эффективность определяется свойствами атмосферы в месте его установки в той же степени как параметрами самого телескопа и инструмента. Сбор данных об астроклимате – комплексе атмосферных условий влияющих на астрономические наблюдения – необходим для оценки выполнимости задач, проектирования аппаратуры, а в существующих обсерваториях - для оптимизации текущих наблюдений. Мониторинг астроклимата ведется во всех крупных обсерваториях.

Кавказская Горная Обсерватория ГАИШ МГУ не является исключением из этого правила. Созданный и поддерживаемый нами автоматический астроклиматический монитор работает 16 лет и накопленные ряды измерений являются наиболее объемными однородными рядами подобных измерений в мире. В качестве основного инструмента астроклиматического монитора применяется комбинированный многоапертурный датчик мерцаний и монитор дифференциальных дрожаний (MASS-DIMM). В 2023 продолжался набор статистики с этим инструментом. На 2.5-м телескопе выполнялась отработка методики спекл-интерферометрии и ее применение для исследований с высоким угловым разрешением.

В 2023 году были продолжены работы по разработке новых инструментов для измерения параметров атмосферной турбулентности. Так, был изготовлен DIMM, использующий два объектива диаметром по 70 мм. С этим инструментом в сотрудничестве с ИНАСАН были выполнены пробные измерения качества изображения в двух перспективных места: на г. Курапдаг и в с. Ташанта, а также в КГО.

Основная часть

Совместно с ИНАСАН проводились полевые исследования астроклимата в местах, перспективных для установки крупных телескопов. Изготовлен и опробован в полевых условиях датчик дифференциальных дрожаний (DIMM) новой конструкции. Датчик состоит из двух линзовых объективов с диаметром 70 мм и фокусным расстоянием 900 мм. Оптические оси линз расположены на расстоянии 300 мм. Таким образом прибор эквивалентен классическому прибору DIMM с телескопом диаметром 370 мм. Свет звезд от обоих объективов проходит через фильтр (полоса V Джонсона) и два изображения звезды строятся на одном КМОП приемнике с низким шумом считывания ($\sim 3e$) разрядностью оцифровки 12 бит и частотой кадров 314 кадров в секунду. В состав прибора включен подсмотр с КМОП-матрицей с полем зрения 3x3 градуса. Вес прибора в сборе составляет всего 7.5 кг. Это позволяет использовать его в полевых условиях с любительской монтировкой типа EQ5 на раскладном штативе.

Произведены тестовые наблюдения с датчиком дифференциальных дрожаний в двух выездах (в подмосковье и в Калмыкию), на крыше ГАИШ (Москва), а также в КГО. В КГО произведено сравнение показаний DIMM с оценками атмосферных изображений на 2.5 м телескопе получаемых в приборе “Спекл-Поляриметр”, показано хорошее совпадение результатов.

Установлены метеостанции, GPS-станции и акустические измерители атмосферной турбулентности для мониторинга на постоянной основе в двух перспективных пунктах. Курапдаг (Дагестан, Агульский район), высота 3700 м н.у.м., и в

пос. Ташанта (Республика Алтай, Кош-Агачский район), высота 2100 м н.у.м.. Оба места обладают аномально низким количеством осажденной воды. В обоих пунктах произведены полевые оценочные исследования качества изображения с помощью созданного прибора DIMM. В точке Курапдаг результаты эпизодические ввиду сильного ветра (более 15 м/с) отсутствия хорошей погоды во время экспедиции. Тем не менее, было сделано несколько измерений в ночь с 10 на 11 июля 2023 г. которые показали медианное значение качества изображения около 1.7”.

В пункте Ташанта удалось провести мониторинг размеров изображений одну неполную ночь (27-28 октября 2023) и одну полную (28-29 октября 2023). В ночь с 27 на 28 октября размер изображений испытывал большие колебания и в некоторые моменты достигал значений 0.55 угловой секунды, при медианном значении за ночь 1.65 секунды. В следующую ночь размер изображений отличался большой стабильностью на уровне 2.2 угловых секунды. Примерно такое же значение ~2” показывала акустическая метеостанция установленная днем 28 октября на крыше школы. Из чего нами был сделан вывод о сосредоточении турбулентности в приземном слое. Было решено установить в Ташанте стационарный астроклиматический пост на основе датчика Шака-Гартмана созданного нами в прошлом году.

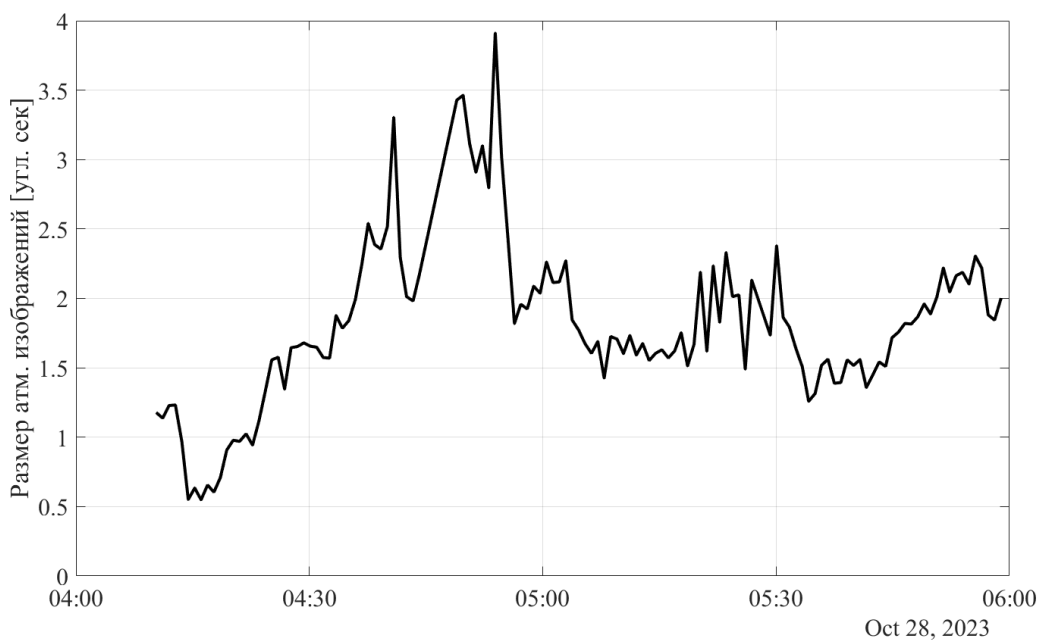


Рис 1. Пример качества изображения близ поселка Ташанта в ночь с 27 на 28 октября 2023.

Метеостанция на горе Курапдаг вышла из строя. в Ташанте ведется постоянный мониторинг метеоусловий. Средние значения скорости ветра составляют 3-5 м/с.

В течение 2023 года в обычном режиме выполнялись наблюдения на астроклиматическом посте (АСМ) КГО ГАИШ МГУ, основным инструментом которого является MASS-DIMM (Многоапертурный датчик мерцаний и монитор дифференциальных дрожаний - Multiaperture Scintillation Sensor Differential Image Motion Monitor). Была проведена чистка оптики телескопа, благодаря чему его пропускание возросло в 2.1 раза. В управляющем программном обеспечении был исправлен ряд ошибок, что уменьшило время простоя. Полный объем полученных

данных составил 1109 часов, что соответствует многолетнему среднему количеству ясного ночного времени. Медианное качество изображения оказалось 1.16 угловой секунды - это значимо хуже чем в предыдущие годы (2007-2021). Данные АСМ, такие как качество изображения, прозрачность, фон неба были доступны наблюдателям на 2.5-м и 60-см телескопах КГО практически в реальном времени (с задержкой 1 минута).

Исследовались экспресс-методы обработки измерений с прибором DomeCam, предназначенным для измерения интенсивности подкупольной турбулентности методом анализа пространственно-временной корреляции картины мерцаний в зрачке 2.5-м телескопа. Было предложено и реализовано в программном коде несколько вариантов:

- цифровой фильтр,
- цифровой фильтр с выколотым центральным пикселем,
- цифровые фильтры, вычисляющие индексы мерцаний MASS,
- восстановление ОТ методом неотрицательных наименьших квадратов по АКФ картины мерцаний.

Целью экспресс-методов является построение оценок полной мощности ОТ на луче зрения (для сравнения результатов прибора с измерениями MASS/DIMM) по АКФ картины мерцаний и мощности подкупольной ОТ по АКФ с задержкой по времени (получение этой оценки в реальном времени является основным предназначением прибора) без восстановления вертикального профиля ОТ и скорости ветра. Важность экспресс-методов обусловлена тем, что восстановление вертикальных профилей более сложная задача, как методологически, так и с вычислительной точки зрения.

Были проведены сравнения оценок, полученных этими методами, и одновременных измерений прибора MASS/DIMM. К сожалению, пока наблюдается сильное рассогласование значений полной мощности ОТ на луче зрения, получаемой на двух приборах, а также получаемой разными методами. Однако, в качестве положительного результата можно указать, что в случае, когда Domecam и MASS/DIMM измеряли одну и ту же звезду (к сожалению, таких случаев мало) индексы мерцаний построенные по измерениям Domecam и полученные прибором MASS/DIMM обладают высокой корреляцией (для некоторых индексов — больше 0.95). Отсутствие строгого совпадения индексов мерцаний может объясняться тем, что Domecam и MASS/DIMM работают в разных спектральных полосах. В отсутствии уверенного совпадения измерений двух приборов, следующим этапом на пути совершенствования методики должно являться, по-видимому, прямое численное моделирование измерений Domecam.

В 2022 году мы провели модернизацию спекл-поляриметр, являющегося штатным прибором 2.5-м телескопа. Был установлен низкошумящий CMOS детектор последнего поколения Hamamatsu ORCA quest C15550-20UP. Также была практически полностью переработана оптомеханика прибора. В отчетном 2023 году велись работы по оптимизации методики наблюдений на новой версии спекл-поляриметра. Мы уточнили модель дисторсии компенсатора атмосферной дисперсии (ADC) спекл-поляриметра. Были выполнены подробные измерения с использованием внутреннего источника, представляющего собой матрицу отверстий. Далее было построено аффинное преобразование, описывающее искажение изображения возникающее из-за ADC. Установлена зависимость параметров этого преобразования от углов поворота призм ADC. Эти измерения были проведены как для режима спекл-интерферометрии (при светоделительном кубике, выведенном из пучка), так и для режима двухлучевой поляриметрии, в последнем случае для каждого из лучей поляриметра в отдельности. Учтен эффект неперпендикулярности оптической оси

телескопа и оси высоты, который вызывал добавочное смещение позиционного угла. Для проверки модели были проведены более 100 наблюдений широких двойных звезд, координаты которых известны из каталога Gaia. Эти наблюдения показали что описанная модель позволяет оценивать позиционный угол двойных звезд с точностью 0.1 градуса разделение - с точностью 0.1%., т.е. в 5-10 раз точнее чем с предыдущей моделью дисторсии.

Внедрена новая процедура центровки объекта в главном детекторе, значительно снижающая накладные расходы, так, темп спекл-интерферометрических наблюдений сейчас достигает 15-20 звезд в час. Также для снижения накладных расходов мы применили активную синхронизацию детектора с полуволновой пластинки, что позволило ликвидировать необходимость ввода линейного поляризатора в начале и конце серии. Мы реализовали процедуру автоматической фокусировки изображения в спекл-поляриметре по размерам одновременно регистрируемых пред- и зафокальным изображений. Завершена работа над статьей, описывающей модернизацию прибора, проводившуюся в 2022 году. Статья опубликована в астрофизическом бюллетене: Страхов, Сафонов, Черясов, Астрофиз. Бюлл. т.78, №2, с. 125 (2023).

Продолжались спекл-интерферометрические наблюдения звезд с экзопланетами, было выполнено 1164 измерения в рамках программы наземной поддержки КА TESS. В 2023 году наши наблюдения были использованы в анализе в 13 статьях. Улучшена методика восстановления фазовой информации по усредненному биспектру. Этот метод позволяет снимать неопределенность 180 градусов в позиционном угле, а также имеет потенциал повышения чувствительности к слабым компонентам. Метод биспектрального восстановления был также протестирован на протяженных объектах - спутниках Юпитера. Был начат обзор членов рассеянного скопления Плеяды на предмет двойственности. Выполнялась фотометрия покрытий звезд Луной с целью определения их угловых диаметров, а также параметров двойственности в случае наличия таковой.

В 2023 году студентами астрономического отделения при нашем руководстве была продолжена работа над макетом датчика Шака-Гартмана для установки на 70-см телескопе АЗТ-2. Были проведены первые пробные измерения на телескопе. Макет предполагает одновременную регистрацию изображения и гартманограммы, что в будущем позволит выполнять обрабатывать восстановление волнового фронта, а также оценку функции рассеяния точки с последующим использованием ее для восстановления изображения методом деконволюции. Макет оснащен также внутренним лазерным источником света, с которым измерения будут выполняться через имитатор атмосферной турбулентности. В 2023 году нами исследовалась технология изготовления имитатора турбулентности методом полимерной 3D печати.

Заключение

В совместной работе с ИНАСАН получены следующие основные результаты: Разработан и изготовлен походный вариант датчика атмосферных дрожаний. Произведено сравнение данных получаемых на этом датчике с реальными размерами изображений на 2.5 метровом телескопе КГО ГАИШ МГУ. Сделано 4 полевых выезда с прибором: Курапдаг (дагестан) высота 3700 м, Точка в республике Калмыкия (высота -17 м), Поселок Ташанта, Республика Алтай (высота 2100 м), точка в Московской

области, (высота 120 м). Во всех этих пунктах получены ряды измерений размеров атмосферных изображений продолжительностью от нескольких часов до двух ночей. На горе Курапдаг и в поселке Ташанта установлены метеостанции.

С автоматизированным астроклиматическим постом получено 1109 часов измерений, медианное качество изображения составило 1.16 секунд дуги. Разработаны экспресс-методы обработки измерений с Domesat - прибором для измерения мощности подкупольной турбулентности.

Продолжено развитие методов достижения дифракционного разрешения на базе спекл-поляриметра - штатного прибора 2.5-м телескопа. По измерениям с внутренним калибровочным источником построена модель дисторсии компенсатора атмосферной дисперсии. Разработан и проверен на измерениях известных двойных звезд метод коррекции дисторсии компенсатора атмосферной дисперсии. Результирующая точность астрометрических измерений (измерений взаимных положений двойных звезд) улучшилась по сравнению с точностью которая достигалась ранее в несколько раз и составила 0.1% по масштабу и 0.1 градус по позиционному углу. Ряд улучшений по методике наблюдений со спекл-поляриметром позволил существенно увеличить темп обхода целей - до 15-20 в час. Получено 1165 измерений двойных звезд по программе наземной поддержки КА TESS.

Выполнены пробные измерения на 70-см телескопе АЗТ-2 в Москве с макетом быстрого датчика Шака-Гартмана, созданного студентами астрономического отделения Герасимовым и Будниковой под нашим руководством.

Список статей в 2023 году:

1. Speckle Interferometry with CMOS Detector. Strakhov, I. A.; Safonov, B. S.; Cheryasov, D. V., *Astrophysical Bulletin*, vol. 78, issue 2, pp. 234-258.
2. Another shipment of six short-period giant planets from TESS Rodriguez, J. and 133 co-authors, including Safonov, B.S., Belinski, A.A., Goliguzova, M.V.,. *MNRAS*, Volume 521, Issue 2, pp.2765-2785.
3. Two Warm Neptunes transiting HD 12572 revealed by TESS & Cheops, Osborn, H.P. and 129 co-authors, including Goliguzova, M.V., Belinski, A.A. *MNRAS*, Volume 523, Issue 2, pp.3069-3089.
4. TESS Giants Transiting Giants. III. An Eccentric Warm Jupiter Supports a Period-Eccentricity Relation for Giant Planets Transiting Evolved Stars, Grunblatt, S. and 30 co-authors, including Safonov, B.S., Strakhov, I.A. *AJ*, Volume 165, Issue 2, id.44, 15 pp.
5. The TESS Grand Unified Hot Jupiter Survey. II. Twenty Hot Jupiters, Yee, S. and 87 co-authors, including Safonov B.S., Belinski, A.A., *ApJSS*, Volume 265, Issue 1, id.1, 32 pp.
6. Three Short-Period Large Exoplanets with a Long-Period Super-Jupiter Companion Orbiting TOI-4010. Kunimoto, M. and 56 co-authors, including Safonov B.S., Goliguzova, M.V., *AJ*, Volume 166, Issue 1, id.7, 22 pp.

7. Two super-Earths at the edge of the habitable zone of the nearby M dwarf TOI-2095. Murgas, F. and 44 co-authors, including Safonov, B.S., Strakhov, I.A., *Astronomy & Astrophysics*, Volume 677, id.A182, 28 pp.
8. TOI-1695 b: A Keystone Water World Elucidating Radius Valley Emergence Mechanisms Around Early M Dwarfs, Cherubim, C. and 42 co-authors, including Safonov, B.S. ..., *AJ*, Volume 165, Issue 4, id.167, 17 pp.
9. Two Warm Super-Earths Transiting the Nearby M Dwarf TOI-2095. Quintana, E. and 59 co-authors, including Safonov B.S., *AJ*, Volume 166, Issue 5, id.195, 15 pp.
10. VaTEST. II. Statistical Validation of 11 TESS-detected Exoplanets Orbiting K-type Stars, Mistry, P. and 51 co-authors, including Goliguzova, M.V., Strakhov, I.A., *AJ*, Volume 166, Issue 1, id.9, 21 pp.
11. TOI-5126: A hot super-Neptune and warm Neptune pair discovered by TESS and CHEOPS, Fairnington, T., and 36 co-authors, including Safonov, B., Belinski, A., *MNRAS*, Oct 2023.
12. TESS Spots a Super-puff: The Remarkably Low Density of TOI-1420b, Yoshida, S. and 54 co-authors, including Safonov, B.S., Goliguzova, M.V., Strakhov, I.A., *The Astronomical Journal*, Volume 166, Issue 5, id.181, 12 pp.
13. A Mini-Neptune Orbiting the Metal-poor K Dwarf BD+29 2654, Dai, F. and 51 co-authors, including Belinski, A. *The Astronomical Journal*, Volume 166, Issue 2, id.49, 14 pp.
14. TOI 4201 b and TOI 5344 b: Discovery of Two Transiting Giant Planets around M-dwarf Stars and Revised Parameters for Three Others, Hartman, J. and 65 co-authors, including Goliguzova, M., Tatarnikov, A., *The Astronomical Journal*, Volume 166, Issue 4, id.163, 23 pp.