

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

Реферат

В рамках данной темы мы разрабатываем и применяем методы характеристики оптической турбулентности на луче зрения - от входа в атмосферу земли и до главного зеркала телескопа. Эта проблематика тесным образом связана с методами получения астрофизической информации на крупном телескопе с дифракционным разрешением. Действительно, именно атмосферная оптическая турбулентность является главным фактором ограничивающим угловое разрешение наземных телескопов.

В 2024 году мы продолжили развивать методику измерения подкупольной турбулентности по картине мерцаний в выходном зрачке телескопа. Работа выполняется на базе специального прибора domesat, постоянного установленного на 2.5-м телескопе Кавказской Горной Обсерватории (КГО). Проведено сравнение результатов измерений на domesat с наблюдениями на астроклиматическом poste, показано хорошее согласие. Проведен предварительный анализ зависимости интенсивности подкупольной турбулентности от обстоятельств измерений.

Продолжались текущие наблюдения на астроклиматическом poste КГО, получено 974 часов измерений профиля турбулентности в атмосфере. Также выполнялись измерения прозрачности, фона неба. Измерения доступны наблюдателям на 2.5-м телескопе в режиме реального времени и используются для принятия решений о использовании того или иного прибора.

Пассивные методы высокого разрешения - спекл-интерферометрия и, разработанная нами, дифференциальная спекл-поляриметрия - применяются на базе спекл-поляриметра - штатного прибора 2.5-м телескопа. В 2024 году были продолжены работы по отладке методики, а также выполнялись наблюдения по текущим астрофизическим программам. В частности, исследовалась двойственность всех звезд в плеядах до $G=15$ (всего 420 звезд), звезд с экзопланетами (623 звезды) и так далее.

Введение

Применение методов высокого углового разрешения на наземных телескопах для получения новой астрофизической информации сохраняет высокую актуальность. Наземные телескопы вне конкуренции по размерам апертуры в оптическом и радиодиапазонах, а значит и по дифракционному угловому разрешению. Немаловажно также то что аппаратуру наземного телескопа легко обслуживать и улучшать. Последнее обстоятельство крайне важно для применения методов достижения высокого углового разрешения, остающихся одним из тех разделов экспериментальной астрономии, в которых применение новых оригинальных подходов к регистрации излучения дает существенное конкурентное преимущество.

В связи с этим неудивительно что в мире серьезные ресурсы направлены на строительство новых телескопов и инструментов для них. Примерами могут послужить европейский сверхбольшой телескоп (ELT), создаваемый в настоящее время на горе Армазонес в Чили, американский 30-м телескоп TMT, установка которого запланирована на Мауна Кеа (Гавайские о-ва), гигантский магелланов телескоп (GMT), местом установки которого станет Сьерро Пачон в Чили. Для всех этих телескопов основным режимом станет работа с компенсацией искажений, вызванных

атмосферной турбулентностью, т.е. с достижением дифракционного углового разрешения.

Оптическая турбулентность, как в свободной атмосфере, так и под куполом телескопа, как основной фактор препятствующий достижению высокого разрешения, также требует всестороннего исследования.

В рамках темы мы развиваем и применяем методы исследования оптической турбулентности и методы достижения высокого разрешения. Выполняются измерения профиля турбулентности на автоматизированном астроклиматическом мониторе Кавказской Горной Обсерватории (КГО). Для исследования свойств подкупольной турбулентности в башне 2.5-м телескопа КГО нами создан и эксплуатируется прибор domesam. Также мы реализуем пассивные методы достижения высокого разрешения - спекл-интерферометрию и дифференциальную спекл-поляризметрию - на базе одного из штатных инструментов 2.5-м телескопа - спекл-поляриметра, представляющего собой комбинацию спекл-интерферометра и двухлучевого поляриметра.

Основная часть

В 2024 продолжались наблюдения на спекл-поляриметре - штатном приборе 2.5-м телескопа КГО, реализующем методы высокого углового разрешения, в частности, спекл-интерферометрию. Суммарное время накопления составило 89.6 часов. Был завершен начатый в 2023 году обзор 420 членов рассеянного скопления Плеяды на предмет двойственности. Несмотря на то что Плеяды - это одно из наиболее изученных рассеянных скоплений, нам удалось найти 20 новых двойных звезд, таким образом существенно дополнив статистику двойственности в этом скоплении. Статья по данной работе отправлена в журнал.

Обнаружение новых двойных звезд в Плеядах стало возможно благодаря как расширению возможностей прибора, прошедшего модернизацию в 2022 году, так и развитию методики спекл-интерферометрических наблюдений. В частности, теперь для улучшения точности оценки спектра мощности научной звезды мы применяем измерения опорных звезд, выполняемых незадолго до и вскоре после наблюдения научной звезды. Использование опорных звезд в случае 2.5-м телескопа оказывается весьма эффективно благодаря высокой скорости и точности наведения. Так, переход между опорной и научной звездами находящимися на расстоянии 1 градус занимает примерно 4 секунды. Этот метод позволяет устранить влияние дрожаний монтировки и остаточной дисперсии на спектр мощности. Применение опорных звезд позволило улучшить точность определения контраста двойных звезд. Однако переоценка разности блеска, составляющая обычно 0.1-0.2 звездных величин, все же присутствует, она станет предметом дальнейшего анализа.

Была обнаружены межпиксельные вариации нелинейности главного детектора Hamamatsu ORCA-quest, характерные для технологии КМОП. Разработана и внедрена методика коррекции этого эффекта. Без коррекции этот эффект вносит доминирующий вклад в шум измерений для ярких объектов.

Продолжались спекл-интерферометрические наблюдения звезд с экзопланетами в рамках программы наземной поддержки КА TESS. Всего было выполнено 623 наблюдения 473 объектов. Из них 29 оказались двойными/кратными. Спекл-интерферометрические наблюдения позволяют обнаруживать звездные компоненты в диапазоне разделений 0.08-0.5", недоступном КА Gaia. Двойственность необходимо учитывать при определении параметров экзопланет. Также исследование

корреляции двойственности и наличия планетной системы потенциально позволяет наложить ограничения на параметры процесса планетообразования.

По теме наземной поддержки TESS в 2024 году опубликовано 10 статей. Например, из 15 объектов работы Polanski et al 2024 у одной звезды (TOI-1443) нами был обнаружен звездный компонент на разделении 0.53". Этот результат подтверждается наблюдениями на NIRI/Keck. Гравитационная связанность компонент показана нашими наблюдениями в четыре эпохи, полная база составила 2.8 года. Компоненты системы имеют спектральные классы K0V и M4.5V. Наличие звездного компонента подтверждается также обнаруженным с помощью спектрографа HIRES/Keck изменением лучевой скорости: 0.029 m/s/d. Для остальных 14 объектов нами наложены ограничения на яркость звездного компонента.

Выполнялись наблюдения по программам НКРТТ, в том числе фотометрия покрытий звезд Луной.

Продолжил работу в полностью автоматическом режиме астроклиматический пост КГО. Было получено 974 часа измерений параметров атмосферной турбулентности. Это на 15-20% меньше чем в среднем за тот же период в прошлые годы. Медианное интегральное качество изображения составило 1.06", что несколько лучше чем величины, наблюдавшиеся в 2021-2023 годах: 1.15-1.3.

При участии инженера КГО Сеника В.А. выполнялись работы по поддержке бесперебойной работы АСМ. Восстановлен обогрев коррекционной пластины, который позволяет исключить ситуации ее запотевания. Заменен вышедший из строя управляющий компьютер.

Продолжено развитие методики измерения подкупольной турбулентности по картине мерцаний - domesat. Прибор постоянно установлен на 2.5-м телескопе КГО, на нем выполнялись регулярные измерения в различных условиях внешней среды. Всего в 2024 году получено 48 измерений.

Domesat выполняет измерения потока от яркой звезды в плоскости выходного зрачка, либо с плоскостью, сопряженной на 2 км за входным зрачком. В качестве детектора применяется ПЗС матрица, пиксель которой соответствует 1.1 см на входном зрачке. Таким образом апертура оказывается вписана в квадрат 227x227 пкс. Используемые экспозиции 2-4 мс, скорость получения кадров 100 кадров в секунду. Длительность накопления 60 сек.

Ранее в статье (Kornilov et al 2021) мы показали что данные измерений потока, регистрируемые панорамным детектором как описано выше, удобно обрабатывать используя преобразование Фурье. В 2024 году был разработан метод, который позволяет по данным domesat вычислять индекс мерцаний для произвольного апертурного фильтра, т.е. для апертуры произвольной формы, имеющей размер больше величины шага сетки и меньшей чем полный диаметр питающей апертуры. Особенностью метода является то что он не опирается на какие-либо предположения о профиле турбулентности и скорости/направления ветра, что делает его весьма надежным.

Используя этот метод для измерений выполненных с domesat мы выполнили оценки ожидаемых индексов мерцаний при регистрации с прибором MASS (Multi-Aperture Scintillation Sensor). MASS входит в состав автоматического астроклиматического поста КГО как часть комбинированного прибора MASS-DIMM. MASS выполняет измерения потока в четырех апертурах - одной имеющей круглую форму и еще три - в форме вложенных колец. При расчетах учитывается различие в

спектральной чувствительности. Так, MASS имеет центральную длину волны 500 нм, а domesam - 650 нм. Также учитывается различие в экспозициях.

Далее, индексы мерцаний MASS, рассчитанные по измерениям domesam, были сопоставлены с реальными индексами мерцаний MASS. Для этого сравнения мы использовали 23 измерения в которых 2.5-м телескоп и телескоп АСМ отслеживали одну звезду. Как для обычных индексов мерцаний, так и для дифференциальных индексов мерцаний было показано прекрасное совпадение. Коэффициент корреляции Пирсона составил 0.95-0.99. Учитывая то что методика MASS была многократно верифицирована относительно других методов измерения профиля турбулентности, этот результат свидетельствует о корректности методологии измерений флуктуаций потока, выполняемых с domesam.

Было проведено сравнение качества изображения, предсказываемого из интеграла интенсивности турбулентности по данным domesam, и полуширины длинноэкспозиционного изображения, одновременно регистрируемого СПП. Показано хорошее совпадение.

Предварительный анализ 97 измерений, полученных на domesam в 2022-2023 гг, был проведен студентом факультета космических исследований Мироновым А.С. в его дипломной работе "Измерение подкупольной турбулентности по картине мерцаний на 2,5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ".

Были исследованы корреляции интенсивности подкупольной турбулентности с различными параметрами: температурами воздуха снаружи и внутри купола, температурой зеркала, скоростью и направлением ветра, высотой точки на которую направлен телескоп. Наиболее надежная корреляция была зафиксирована между интенсивностью подкупольной турбулентности и разностью температур воздуха внутри башни и температурой главного зеркала. Эта зависимость вполне ожидаема, поскольку при значительном отклонении температуры зеркала от температуры окружающего воздуха в последнем развивается конвекция, генерирующая оптическую турбулентность.

В 75% случаев разность температур отрицательна, т.е. зеркало оказывается теплее чем окружающий его воздух. Медианная разность составила -1° . В 65% случаев разность температур воздуха внутри башни и зеркала больше -2° - это ситуации соответствуют благоприятным условиям - вклад интенсивности подкупольной турбулентности в качество изображения менее $1''$. Экстремальные значения этой разности температур, при которой выполнялись измерения с domesam, это -10° и $+2^{\circ}$. В этих ситуациях вклад подкупольной турбулентности в качество изображения составлял $3''$ и $0.5''$, соответственно. Режим в котором зеркало существенно холоднее окружающего воздуха довольно редок и не был исследован подробно. Практически никакого влияния скорости ветра и высоты на интенсивность подкупольной турбулентности зафиксировано не было.

Заключение

В 2024 году продолжены регулярные наблюдения на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ с прибором измерения подкупольной турбулентности domesam, получено 48 измерений. Разработана методика сравнения результатов измерений с domesam и многоапертурного датчика мерцаний (MASS), входящего в состав астроклиматического монитора (ASM). Посредством одновременных наблюдений на MASS и domesam

показана корректность методики последнего. Выполнено сравнение измерений domesat с одновременными измерениями полуширины на спекл-поляриметре.

Проведен предварительный анализ зависимости интенсивности подкупольной турбулентности от обстоятельств измерений. Наиболее четкая корреляция прослеживается с разностью температур главного зеркала и окружающего его воздуха. Это говорит о доминирующем вкладе конвекции развивающейся над главным зеркалом в оптическую турбулентность. Скорость и направление ветра, а также ориентация трубы телескопа относительно вектора силы тяжести на интенсивность подкупольной турбулентности практически никак не влияют.

В 2024 выполнялись наблюдения на АСМ КГО в автоматическом режиме, проводились текущее обслуживание и модернизация оборудования. Получено 974 часов измерений. Результаты обработки измерений: качество изображения, прозрачность, фон неба доступны наблюдателям в реальном времени.

На спекл-поляриметре 2.5-м телескопа велись наблюдения по текущим программам: проведен обзор двойственности звезд в Плеядах, выполнялась проверка на двойственность звезд с экзопланетами. Отлажена методика оценки спектра мощности с использованием опорных звезд, а также коррекция межпиксельных вариаций плоского поля. Эти улучшения позволили увеличить точность оценок контраста, а также открыть ряд двойных звезд с разделением сравнимым с дифракционным разрешением телескопа.

Список статей в 2024 году

1. Discovery and characterization of a dense sub-Saturn TOI-6651b. Baliwal Sanjay, ..., Safonov Boris S., Strakhov Ivan A., ... в журнале *Astronomy and Astrophysics*, издательство Springer Verlag (Germany), том 691
2. TOI-1173 A b: The First Inflated Super-Neptune in a Wide Binary System. Galarza Jhon Yana, ... Safonov Boris в журнале *Astronomical Journal*, издательство American Astronomical Society (United States), том 168, № 2, с. 91.
3. The GAPS programme at TNG. LVII. TOI-5076b: A warm sub-Neptune planet orbiting a thin-to-thick-disk transition star in a wide binary system. Montalto M., ... Safonov B.S., ... Strakhov I.A., в журнале *Astronomy and Astrophysics*, издательство Springer Verlag (Germany), том 687 DOI
4. 2024 ZZ Tau IRS: маломассивная звезда типа UX Ori с интенсивным ветром Бурлак М.А., Додин А.В., Жарова А.В., Желтоухов С.Г., Иконникова Н.П., Ламзин С.А., Потанин С.А., Сафонов Б.С., Страхов И.А., Татарников А.М. в журнале *Астрофизический бюллетень*, издательство CAO РАН (Нижний Архыз), том 79, № 2, с. 290-307 DOI
5. The TESS-Keck Survey. XX. 15 New TESS Planets and a Uniform RV Analysis of All Survey Targets. Polanski Alex S., ...Ershova Irina O., Cheryasov Dmitry V., Safonov Boris, ... в журнале *Astrophysical Journal, Supplement Series*, издательство University of Chicago Press (United States), том 272, № 2, с. 32 DOI
6. The Discovery and Follow-up of Four Transiting Short-period Sub-Neptunes Orbiting M Dwarfs. Hori Yasunori, ... Safonov Boris S., Strakhov Ivan A., ... в журнале *Astronomical Journal*, издательство American Astronomical Society (United States), том 167, № 6, с. 289 DOI

7. TOI-1135 b: A young hot Saturn-size planet orbiting a solar-type star Mallorquín M., ... Safonov B., Strakhov I.A., ... в журнале Astronomy and Astrophysics, издательство Springer Verlag (Germany), том 685 DOI
8. VaTEST III: Validation of eight potential super-earths from TESS data. Mistry Priyashkumar, ... Safonov Boris S., ... в журнале Publications of the Astronomical Society of Australia, издательство Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization Publishing (Australia), том 41, с. e030 DOI
9. The GAPS programme at TNG. XLIX. TOI-5398, the youngest compact multi-planet system composed of an inner sub-Neptune and an outer warm Saturn. Mantovan G., Cheryasov D., Strakhov I., ... в журнале Astronomy and Astrophysics, издательство Springer Verlag (Germany), том 682.
10. Migration and Evolution of giant ExoPlanets (MEEP). I. Nine Newly Confirmed Hot Jupiters from the TESS Mission. Schulte Jack, ... Strakhov Ivan A., ...Gerasimov Ivan S., ... в журнале Astronomical Journal, издательство American Astronomical Society (United States), том 168, № 1, с. 32 DOI
11. Visible-light High-contrast Imaging and Polarimetry with SCExAO/VAMPIRES. Lucas Miles, ... Safonov Boris, ... в журнале Publications of the Astronomical Society of the Pacific, издательство University of Chicago Press (United States), том 136, № 11, с. 114504 DOI
12. TOI-5126: A hot super-Neptune and warm Neptune pair discovered by TESS and CHEOPS Fairnington Tyler R., ... Belinski Alexandre A., ... Safonov Boris S., ... в журнале Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, издательство Oxford Journals, Oxford University Press (Oxford, UK, England), том 527, № 3, с. 8768-8783 DOI