

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

Руководитель: Сафонов Б.С. Участники НИР: Горбунов И.А., Корнилов М.В., Купряков Ю.А., Семенихин Т.А., Страхов И.А., Черясов Д.В.

Реферат

Эффективность применения современных методов наблюдательной астрономии на наземных телескопах в значительной степени определяется свойствами оптической турбулентности в месте установки телескопа. Данная тема охватывает работы по разработке методов измерения свойств оптической турбулентности, а также ее преодоления с целью повышения углового разрешения крупных телескопов. Актуальность этих исследований с годами будет возрастать по мере ввода в строй все более крупных телескопов: Европейский сверхбольшой телескоп (ELT), тридцатиметровый телескоп (TMT), гигантский магелланов телескоп (GMT). Прикладные работы по теме выполняются на базе Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ, однако получаемые методические результаты применимы и на других обсерваториях.

В 2022 году выполнялись измерения интенсивности подкупольной турбулентности в башне 2.5-м телескопа КГО с помощью разрабатываемого нами прибора DomeCam. Продолжена разработка теоретических основ для обработки наблюдений с DomeCam. Продолжены регулярные наблюдения на астроклиматическом посту КГО ГАИШ МГУ. Получено 1065 часов измерений, что примерно соответствует общему количеству ясного времени на месте установки 2.5-м телескопа КГО. Медианное качество изображения составило 1.31 секунд дуги. Создан инструмент для измерения профиля турбулентности с помощью быстрого датчика Шака-Гартмана, получены первые измерения. Изготовлен макет датчика волнового фронта для системы адаптивной оптики, отработаны измерения с ним в лабораторных условиях с имитатором турбулентности. Проведена модернизация спекл-поляриметра - прибора для достижения дифракционного разрешения на 2.5-м телескопе. Наблюдения с улучшенной версией прибора начаты в штатном режиме в августе.

Введение

Знание свойств атмосферной оптической турбулентности важно для эффективной реализации любых методов наблюдательной астрономии на крупных телескопах. Однако особую актуальность оно приобретает для методов достижения дифракционного разрешения: адаптивной оптики, спекл-интерферометрии, спекл-поляриметрии и других. В рамках данной темы мы выполняем исследование оптической

турбулентности в пучке телескопа, как в свободной атмосфере, так и в подкупольном пространстве, а также исследуем методы достижения дифракционного разрешения. Практическая часть исследований ведется в приложении к 2.5-м телескопу Кавказской Горной Обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ, однако получаемые методические и теоретические результаты применимы применяются и на других обсерваториях.

Для измерения профиля турбулентности и скорости ветра в свободной атмосфере мы используем комбинированный прибор MASS-DIMM - основной инструмент астроклиматического монитора (АСМ) КГО. АСМ установлен в 20-м от башни 2.5-м телескопа. MASS-DIMM в качестве питающей оптики использует 35-см телескоп. Комплекс АСМ выполняет наблюдения в полностью автоматическом режиме и обеспечивает наблюдателей КГО информацией об астроклиматических параметрах с задержкой 1-2 минуты: интегральное качество изображения, атмосферная постоянная времени, угол изопланатизма, прозрачность, фон неба. Эти данные позволяют в полной мере реализовывать потенциал 2.5-м телескопа, имеющего разнообразный набор инструментов, переключение между которыми возможно за 2 минуты. Для оценки интенсивности подкупольной турбулентности мы используем прибор DomeCam, принцип действия которого заключается в измерении корреляционных свойств картины мерцаний в зрачке телескопа. DomeCam постоянно установлен на 2.5-м телескопе в фокусе Нэсмита, измерения на нем проводятся регулярно. Выполняется разработка теоретической базы для интерпретации измерений с DomeCam с помощью аппарата цифровой фильтрации.

В рамках работ по теме нами разрабатывается прибор для измерения профиля турбулентности и скорости ветра на базе быстрого датчика Шака-Гартмана. С помощью численного моделирования было показано что этот подход позволяет выполнять восстановление профиля ОТ с разрешением более высоким, чем MASS-DIMM, при использовании на телескопе такого же диаметра апертуры. В 2022 году создан прибор реализующий метод, получены первые измерения, ведется их анализ.

С 2015 на 2.5-м телескопе регулярно ведутся наблюдения в режиме спекл-интерферометрии с разработанным нами прибором - спекл-поляриметром. Прибор также реализует развиваемый нами метод дифференциальной спекл-поляриметрии, направленный на исследование поляризационных свойств астрономических объектов с дифракционным разрешением. В 2022 году была проведена модернизация прибора, освоено использование низкошумящей CMOS-матрицы в качестве основного детектора.

Основная часть

Domecam - прибор для измерения интенсивности подкупольной турбулентности в пучке телескопа. DC регистрирует картину мерцаний от яркой звезды в плоскости сопряженной с высотой -2 км относительно входного зрачка. Регистрация выполняется

на быструю ПЗС матрицу. Отрицательная высота сопряжения, т.н. виртуальное распространение, позволяет получить значимый сигнал от турбулентности с околонулевой высотой. Отделение подкупольной турбулентности и оптической турбулентности в свободной атмосфере выполняется посредством кросс-корреляции картины мерцаний с задержкой по времени. Подкупольная турбулентность показывает скорость ветра значительно меньшую чем типичная скорость в свободной атмосфере, что позволяет выделить ее. Интенсивность подкупольной турбулентности оценивается сравнением полученной эмпирической картины кросс-корреляции, соответствующего нулевой скорости ветра, с модельными представлениями.

Прибор DC установлен в фокусе Нэсмита-2 между телескопом и спекл-поляриметром. Свет в DC отбирается дихроичным зеркалом так, что возможны одновременные наблюдения с DC и спекл-поляриметром. Спекл-поляриметр используется также для точного наведения на звезду и фокусировки.

В 2022 с помощью DomeCam (DC) выполнялись наблюдения на 2.5-м телескопе в различных условиях: различный перепад температур между главным зеркалом и окружающим воздухом, направлении и скорости ветра. Всего было получено 54 измерения. Выполнялся их анализ.

На основе дальнейшего развития подхода безразмерных весовых функций, создана математическая модель, описывающая измерения DomeCam. Ведётся дальнейшая работа по применению для анализа данных перспективного подхода "цифровой фильтрации". Этот подход применим для обработки измерений флуктуаций светового потока входного зрачка оптической системы, регистрируемого приемником изображения (как раз такой способ регистрации и используется в приборе DomeCam), и, за счет формирования отклика системы, обладающего известными полезными свойствами, в некоторых случаях позволяет избежать необходимости решать обратные задачи.

Кроме того, в основном завершено создание программного обеспечения для управления прибором DomeCam и развертывание инфраструктуры; ведётся разработка программного обеспечения для обработки измерений: определения величины подкупольной турбулентности, и решения других перспективных задач, таких, как, например, восстановления профиля ОТ по измерениям DomeCam.

В 2022 году проводилось улучшение спекл-поляриметра - прибора для достижения дифракционного разрешения на 2.5-м телескопе. Основным детектор был заменен на CMOS Hamamatsu ORCA-quest C15550-20UP. Мы выполнили подробное исследование основных характеристик детектора. Было показано что детектор соответствует спецификациям, шум считывания оказался равен 0.48 и 0.27 е при скорости считывания 120 и 5 кадров в секунду, соответственно. Также была исследована нелинейность отклика, которая оказалась весьма значительной. Без коррекции в области низких потоков нелинейность достигает 20%. Был найден закон, позволяющий корректировать нелинейность с точностью 2%.

Стабильность частоты кадров была исследована при помощи источника, представляющего собой светодиод, запитанный от сигнала 1PPS. Было показано что период регистрации постоянен на уровне $1e-8$, что позволяет выполнять пассивную синхронизацию вращения полуволновой пластинки (играющей роль модулятора) и получения кадров.

В итоге детектор Hamamatsu ORCA-quest по шумовым характеристикам сопоставим с EMCCD и представляет большой интерес для реализации пассивных методов достижения дифракционного разрешения, а также для реализации методов измерения профиля турбулентности. Применение детектора для прецизионных измерений потока в режиме длительных экспозиций (фотометрия, спектроскопия) находится под вопросом, поскольку его нелинейность все-таки слишком велика и не стабильна. Требуется ее дальнейший анализ.

Нами было выполнено сравнение эффективности применения CMOS и EMCCD как детектора в спекл-интерферометрии с помощью численного моделирования. Показано что эти детекторы практически эквивалентны. Другими словами, шум считывания Hamamatsu ORCA-quest достаточно мал чтобы им пренебречь для задач спекл-интерферометрии. Применение скользящего затвора может препятствовать надежному определению контраста в спекл-интерферометрии, однако мы показали что в нашем случае этим эффектом можно пренебречь.

Также в рамках работ по модернизации прибора был перепроектирован предфокальный узел. Значительно улучшена стабильность и простота юстировки последнего. Заменена вспомогательная камера, используемая для точного наведения прибора в тех случаях когда ошибка наведения превышает 15 угловых секунд. Новая вспомогательная камера позволяет центрировать телескоп для объектов на 3 величины более слабых чем предыдущая вспомогательная камера. В блоке камеры мы используем в качестве лучерасщепляющего элемента поляризационный светоделительный кубик вместо призмы Волластона. Также реализован режим работы без лучерасщепления и с дифференциальной дефокусировкой. Последний будет использоваться для точной и быстрой автоматической фокусировки прибора.

Спекл-поляриметр в обновленной конфигурации был введен в штатную эксплуатацию в августе 2022 года. С этого момента получено значительное количество наблюдений по текущим программам. Так, по программе исследования двойственности звезд с экзопланетами, найденными TESS, выполнено почти 200 наблюдений. Сравнение реальных наблюдений выполненных с EMCCD и CMOS еще раз показало что по шумовым характеристикам последний не уступает первому. В итоге выигрыш в 0.7 звездных величин был достигнут путем применения режима работа без светоделителя: это позволило убрать эффект дисперсии призмы Волластона и сконцентрировать свет на меньшей площади детектора.

В 2022 году проводились работы по созданию инструмента для измерения профиля турбулентности с помощью быстрого датчика Шака-Гартмана. Были написано

рабочие скрипты на языке matlab для обработки данных получаемых с датчика волнового фронта. Программное обеспечение позволяет как получать кадры со скоростью до 500 кадров в секунду, так и производить по ним восстановление волнового фронта в реальном времени. Также возможна оценка параметров атмосферы (таких как радиус Фрида в реальном времени со скважностью 10 секунд) и получение высотного профиля турбулентности со скважностью 1-2 минуты.

Датчик был испытан в лаборатории с искусственным источником света. Были получены характеристики близкие к расчетным. Произведена первичная юстировка для совпадения фокуса в подсмотре и ДШГ.

Совместно с ИНАСАН в звенигородской обсерватории был установлен телескоп системы Ричи-Кретьена диаметром 304 мм и фокусом 2400 мм на экваториальной монтировке. На телескоп установлен рабочий образец датчика Шака-гартмана для исследования параметров атмосферной турбулентности. Телескоп расположен в павильоне с откатной крышей. Монтировкой, телескопом и укрытием телескопа возможно удаленное управление через интернет.

В приборе предусмотрен подсмотр с CMOS-камерой позволяющей производить фокусировку наведение, а также автоматическое гидирование. В начале зимы 2022 были проведены первые испытания прибора на этом телескопе. Были получены кадры от звезды $V=2$ с экспозицией 5 мс. При этом отношение сигнала к шуму в изображениях точек построенных субапертурами составило 50-100 в зависимости от изменения их яркости вследствие мерцаний.

Была проверена работоспособность программного обеспечения, доработаны алгоритмы на реальных данных. Получены оценки параметра Фрида r_0 методом мультиапертурного синтеза дифференциальных дрожаний. Параметр r_0 в наблюдениях составил 118 мм на длине волны 550 нм, что соответствует размеру атмосферных изображений ~ 0.94 угловых секунды. Ввиду невозможности получения большого количества данных (из-за облачности) оценки высотного профиля турбулентности сделаны не были, хотя на реальных гартманограммах была произведена существенная доработка соответствующего программного обеспечения и показана возможность получения надежных оценок пространственного спектра амплитудных возмущений на зрачке.

С учетом этих данных произведена разработка еще одного прибора такого же типа для 300 мм телескопа шмидт-касегрен (MEADE) F/10. А также проработана возможность создания датчика Шака-Гартмана для телескопа Цейсс-600 Терскольской обсерватории ИНАСАН.

В течение года произведено комплексное исследование приемников изображения китайского производства (hikrobot) на предмет их применения в ДШГ (как для исследования атмосферы, так и для датчика волнового фронта системы адаптивной оптики). Были исследованы такие характеристики как максимальная частота кадров, линейность, коэффициент преобразования, динамический диапазон и

шум считывания для 4х CMOS-камер. Две из них оказались пригодными для указанных задач, при этом по характеристикам эти камеры превосходят европейские аналоги и оказались многократно дешевле.

Для исследований датчика в лабораторных условиях был изготовлен макет точечного источника (имитатор звезды в телескопе) с изображениями дифракционного качества при относительных отверстиях $F/35 - F/8$ в диапазоне длин волн 400-800 нм. С помощью данного стенда можно производить испытания любого астрономического (и не только) прибора в котором на входе должно быть точечное изображение.

В 2022 годы выполнялась отработка элементов адаптивной оптики - датчика волнового фронта Шака-Гартмана. Студентами астрономического отделения был спроектирован и собран макет Шака-Гартмана. Макет включает в себя имитатор турбулентности - вращающийся стеклянный диск с нанесенным на него неравномерным покрытием лака. В качестве детектора используется CMOS матрица с шумом считывания 1 е. В ходе работы над макетом было продемонстрировано измерение гартманогам с частотой до 800 Гц, что соответствует типичным частотам применяемым в астрономической адаптивной оптике.

В течение 2022 года в обычном режиме выполнялись наблюдения на астроклиматическом посту (АСМ) КГО ГАИШ МГУ. Проводились мероприятия по поддержке бесперебойной автоматической работы аппаратуры АСМ: юстировка прибора MASS-DIMM, чистка оптики, замена компонентов ИТ инфраструктуры. Благодаря исправлениям в микрокоде микроконтроллеров приводов телескопа АСМ снижено число общее сбоев системы по сравнению с аналогичным периодом прошлого года. Полный объем полученных данных составил 1065 часов, что соответствует многолетнему среднему количеству ясного ночного времени. Медианное качество изображения оказалось 1.31 угловой секунды - это значительно 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 в реальном времени.

Заключение

В 2022 году продолжены регулярные наблюдения на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ с прибором измерения подкупольной турбулентности DomeCam, получено 54 измерения. Проводится работа по интерпретации измерений с DomeCam, в частности оценке профиля турбулентности в свободной атмосфере.

Выполняются наблюдения на АСМ КГО в автоматическом режиме, проводилось улучшение управляющей электроники питающего телескопа. Получено 1065 часов измерений, что примерно соответствует количеству ясного ночного времени. Результаты обработки измерений: качество изображения, прозрачность, фон неба доступны наблюдателям в реальном времени.

Проведена модернизация спекл-поляриметра - прибора для реализации пассивных методов достижения дифракционного разрешения на 2.5-м телескопе: спекл-интерферометрии, дифференциальной спекл-поляриметрии. В качестве главного детектора установлен низкошумящая быстрая CMOS-матрица последнего поколения. Продолжены штатные наблюдения, в том числе по программе исследования двойственности звезд с экзопланетами.

Спроектирован, собран, оттестирован прибор для измерения профиля атмосферной оптической турбулентности на базе быстрого датчика Шака-Гартмана. Выполнены первые пробные наблюдения.

Выполнялась отработка элементов адаптивной оптики: собран макет быстрого датчика Шака-Гартмана, макет испытан в лаборатории с имитатором турбулентности. Проводилось исследование зеркала компенсации наклонов волнового фронта.

Список статей в 2022 году:

1. КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ДАТЧИКА ШАКА-ГАРТМАНА, Потанин С.А., Корнилов М.В., Саввин А.Д., Сафонов Б.С., Ибрагимов М.А., Копылов Е.А., Наливкин М.А., Шмагин В.Е., Ху Л.Х., Тао Н.Т. в журнале *Астрофизический бюллетень*, издательство *САО РАН (Нижний Архыз)*, том 77, № 2, с. 241-249
2. Validation of 13 Hot and Potentially Terrestrial TESS Planets, Giacalone S., ... Safonov, B.S., Strakhov, I.A. et al, в журнале *Astronomical Journal*, издательство *American Astronomical Society (United States)*, том 163, № 2, с. 99
3. The TESS-Keck Survey. XI. Mass Measurements for Four Transiting Sub-Neptunes Orbiting K Dwarf TOI-1246, Turtelboom Emma V., ... Safonov B.S., et al, в журнале *Astronomical Journal*, издательство *American Astronomical Society (United States)*, том 163, № 6, с. 293.
4. The TESS Grand Unified Hot Jupiter Survey. I. Ten TESS Planets, Yee Samuel W., ... Safonov B.S., Strakhov I.A., et al, в журнале *Astronomical Journal*, издательство *American Astronomical Society (United States)*, том 164, № 2, с. 70.
5. TOI-2285b: A 1.7 Earth-radius planet near the habitable zone around a nearby M dwarf, Fukui A.,... Belinskii, A., Safonov B.S., Strakhov, I.A., ... et al в журнале *Publications of the Astronomical Society of Japan*, издательство *Astronomical Society of Japan (Japan)*, том 74, № 1, с. L1-L8.
6. TOI-2257 b: A highly eccentric long-period sub-Neptune transiting a nearby M dwarf, Schanche N., ... Belinskii, A., Safonov B.S., Strakhov, I.A., ... et al, в журнале *Astronomy and Astrophysics*, издательство *Springer Verlag (Germany)*, том 657, с. A45.
7. Spatial Structure of the Dusty Wind of RW Aur A, Safonov, B.S., Dodin A.V., в журнале *Astronomy Letters*, издательство *Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation)*, том 48, № 5, с. 293-302.

8. Confirmation and characterisation of three giant planets detected by TESS from the FIES/NOT and Tull/McDonald spectrographs, Knudstrup E. ... Belinskii, A., Safonov B.S., Strakhov, I.A., ... et al в журнале *Astronomy and Astrophysics*, издательство *Springer Verlag (Germany)*, том 667, с. A22.