

Отчет по теме госзадания

7.4. Исследование оптической атмосферной турбулентности для повышения эффективности работы 2.5-м телескопа КГО за 2016-2020 гг

Руководитель темы: Корнилов В.Г.

Участники НИР: Горбунов И.А., Корнилов М.В., Купряков Ю.А., Сафонов Б.С., Черясов Д.В., Голигузова М.В..

Реферат

Важность исследований астроклимата - атмосферной турбулентности, прозрачности атмосферы и фона неба - общепризнана во всем мире. В ГАИШ МГУ эта тематика развивается уже несколько десятилетий и в последние несколько лет ее актуальность лишь возросла в связи с вводом в строй 2.5-м телескопа Кавказской Горной Обсерватории. В рамках данной темы в 2016-2020 году были выполнены измерения астроклиматических параметров с помощью созданного нами и модернизированного в 2016 году астролиматического поста (АСМ) КГО. Было накоплено 396000 одномоментных измерений профиля турбулентности, прозрачности атмосферы и фона неба (6600 часов), что практически полностью покрывает ясное ночное время за этот период. Данные АСМ доступны оператору телескопа в реальном времени и используются при оперативном планировании наблюдений.

Были продолжены работы по развитию методики измерений профиля атмосферной турбулентности методом MASS-DIMM, выполнен анализ вариаций чувствительности DIMM к турбулентности на разных высотах. Выполняется разработка прибора для исследования подкупольной турбулентности в пучке 2.5-м телескопа - метод domesat. Проведены тестовые наблюдения с этим прибором. Начаты измерения атмосферной турбулентности на месте установки 4-м телескопа Восточно-Анатолийской Обсерватории в рамках сотрудничества с университетом им. Ататюрка (Эрзурум).

Введение

В эру космических обсерваторий применение наземных оптических телескопов сохраняет 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 в ближайшем будущем 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. Без данных о качестве изображения, атмосферной экстинкции, фоне неба невозможна оценка выполнимости задач, проектирование аппаратуры. В последние 20 лет в связи с появлением систем адаптивной оптики знания интегрального качества изображения стало недостаточно - возникла потребность в длительных измерениях профиля турбулентности. Сбор данных об астроклимате – комплексе атмосферных условий влияющих на астрономические наблюдения – ведется во всех крупных обсерваториях.

Кавказская Горная Обсерватория ГАИШ МГУ не является исключением из этого правила. Созданный и поддерживаемый нами автоматический астроклиматический монитор (АСМ) КГО работает 12 лет. Накопленный ряд измерений является одним из наиболее объемных однородных рядов подобных измерений в мире. В качестве основного инструмента АСМ применяется комбинированный многоапертурный датчик мерцаний и монитор дифференциальных дрожаний (MASS—DIMM).

АСМ установлен в непосредственной близости (20 м) от башни основного инструмента КГО - 2.5 м телескопа. Начало выполнения данного проекта совпало со стартом рутинных наблюдений на этом телескопе. После проведения глубокой модернизации инфраструктуры АСМ в 2016 году система работает в автоматическом режиме при минимальном вмешательстве. АСМ в режиме реального времени предоставляет наблюдателям данные о текущих астроклиматических параметрах: качестве изображения, атмосферной экстинкции, фоне неба.

На протяжении проекта мы продолжили развивать методику DIMM, был выполнен анализ вариаций чувствительности к турбулентности на разных высотах.

Существенным фактором, ограничивающим качество изображения на крупных телескопах, и, в частности, на 2.5-м телескопе, является оптическая турбулентность, генерируемая в подкупольном пространстве вследствие обтекания башни ветром и ее неравномерного прогрева. В тоже время общепринятая методика соответствующих измерений еще не сформировалась. Для исследования подкупольной турбулентности и определения стратегии ее последующей минимизации посредством кондиционирования воздуха нами разрабатывается прибор domesam. Domesam выполняет измерения распределения турбулентности по скоростям в пучке 2.5-м телескопа путем анализа пространственно-временных корреляций флуктуаций амплитуды световой волны в зрачке телескопа. Подкупольную турбулентность мы выделяем по ее низкой скорости. Выполнены пробные наблюдения, разрабатывается метод обработки измерений. В 2018-2020 гг. проведены также вспомогательные измерения температуры в нескольких точках башни телескопа.

В рамках сотрудничества с университетом им. Ататюрка (Эрзурум, Турция) мы собрали, отъюстировали и отладили прибор MASS-DIMM для измерений атмосферной оптической турбулентности на месте установки 4-м телескопа Восточно-Анатолийской Обсерватории. В 2018-2020 гг. коллеги из университета им. Ататюрка при нашей поддержке выполняют измерения с этим прибором.

Основная часть

Базовым инструментом астроклиматического монитора (АСМ) КГО ГАИШ является прибор MASS-DIMM, установленный на 30-см любительском телескопе Meade RCX400. MASS-DIMM комбинирует в одном приборе два подхода к измерению ОТ: анализ амплитудных и фазовых флуктуаций волнового фронта от удаленного точечного источника – звезды, методами MASS и DIMM, соответственно. MASS выполняет измерения потока в четырех концентрических апертурах с помощью ФЭУ. Оценки дисперсий флуктуаций этих потоков, вызванных атмосферной турбулентностью, позволяют восстанавливать распределение интенсивности последней по высотам – профиль турбулентности. MASS не чувствителен к турбулентности на высотах менее 500 метров вследствие того что эта турбулентность не порождает мерцания. Этому недостатка лишен датчик дифференциальных дрожаний DIMM. Совместное применение MASS и DIMM позволяет восстанавливать полный профиль турбулентности. Нами также предложен метод измерения и профиля ветра по данным, получаемым MASS.

Анализ состояния оборудования АСМ после завершения длительной астроклиматической кампании на горе Шатматджаз 2007 – 2013 гг выявил практически полное истощения его ресурса. В частности, система управления телескопа АСМ ГАИШ МГУ в 2013 гг вышла из строя. В период 2015 – 2016 гг была разработана и реализована полностью оригинальная система управления телескопом. Также практически полностью было заменено компьютерное оборудование, проработавшее в составе монитора с 2006 г. В результате этой модернизации значительно увеличилась скорость и точность наведения, что позволило сократить время перевода на новый объект с 4-5 мин до 20-40 сек. По сути, создан, оттестирован и запущен в штатную работу новый измерительный комплекс, обладающий характеристиками, пригодными для получения данных в реальном времени.

Комплекс этих работ был особенно необходим в свете перехода астроклиматического монитора в режим сопровождения наблюдений, проводимых на 2.5 м телескопе Кавказской Горной Обсерватории. В 2017-2020 годах АСМ работал в полностью автоматическом режиме лишь с незначительным нашим вмешательством для чистки и подъюстировки оптики, обслуживания автоматического укрытия и т.д. Это показало правильность подхода примененного при модернизации АСМ. АСМ поставляет в реальном времени (с задержкой ~30 секунд) операторам телескопа следующие данные об астроклимате: атмосферное поглощение, фон неба, интегральное качество изображения, атмосферную постоянную времени.

Перечисленные в конце предыдущего параграфа параметры и в дополнение к ним профиль турбулентности и профиль скорости ветра сохраняются в специальной базе данных. Временное разрешение составляет одну минуту. Почти непрерывный ряд измерений оптической атмосферной турбулентности с 2007 года по представительности сравним и в большинстве случаев превосходит аналогичные ряды накопленные в других крупнейших обсерваториях мира, например г. Параналь и других вершинах в Чили. Подчеркнем что наши измерения и измерения на указанных вершинах выполняются по однородной методике в существенной степени разработанной нами, и ставшей де-факто

стандартом измерений оптической турбулентности. Это способствует сравнению измерений.

За 2016, 2017, 2018, 2019 и 2020 год было накоплено 936, 1488, 1343, 1369 и 1464 часов измерений, соответственно. В 2020 году медианное качество изображения составило 1.03 угловой секунды.

В процессе измерений в период астроклиматической кампании 2007–2013 гг получались данные о средних потоках от программных звезд и о текущей величине фона неба. Эти величины необходимы для правильного вычисления индексов мерцаний, позволяющих далее восстановить собственно высотное распределение оптической турбулентности. Еще в 2009 г в программу наблюдений астроклиматического монитора была добавлены специальные экстинкционные измерения, что позволило собрать статистику атмосферной экстинкции в инструментальной полосе прибора MASS. В 2016 г мы завершили полную переобработку измерений с целью определения достоверной статистики и сезонного поведения атмосферных коэффициентов экстинкции. Были получены следующие медианные значения экстинкции: 0.51, 0.28, 0.17, 0.13 и 0.09 звездной величины в полосах U, B, V, R и I, соответственно.

Непосредственно измеренные в процессе мониторинга оптической турбулентности величины фона неба (свыше 17000 оценок) оказались загрязненными рассеянным светом ярких программных звезд и слабыми звездами поля. Поэтому была разработана методика статистического учета этого света на основе анализа временной корреляции измеряемого потока с лагом 1 мсек. Построенная статистика исходит из того что поток от фона неба не имеет такой корреляции, в то время как поток от звезд имеет из-за эффекта мерцаний. С учетом этой поправки были построены статистические распределения яркости ночного неба в полосе прибора MASS6 которые затем трансформированы в стандартные фотометрические полосы. Медианные значения яркости ночного безлунного неба получились 22.1, 21.1, 20.3 и 19.0 звездной величины с квадратной секунды для полос B, V, R и I соответственно.

В общепринятых приближениях дисперсия дифференциальных дрожаний, измеряемая DIMM прямо пропорциональна интегралу интенсивности турбулентности по лучу зрения, т.е. качеству изображения. Однако учет дифракции и распространения световой волны приводит к тому что часть мощности фазовых флуктуаций, к которым чувствителен DIMM, переходит в амплитудные флуктуации (возникают мерцания). Вследствие этого явления чувствительность DIMM ниже для более высоких турбулентных слоев. Мы показали, что учет эффекта распространения может быть выполнен при помощи формализма так называемых весовых функций. Вследствие совместного влияния распространения и конечности спектральной полосы для существующих приборов DIMM весовая функция падает до 0.5—0.7 при дистанциях распространения больше 30 км. Этот эффект хоть и не меняет радикально картину, но должен быть учтен при сравнении обсерваторий, так как разброс качества изображения между лучшими местами того же порядка. Заметим, что использование DIMM в комбинации с MASS решает проблему, так как последний дает оценку профиля турбулентности, соответственно эффект распространения может быть вычислен и учтен. Нами также реализовано совместное восстановление профиля турбулентности по измерениям на комбинированных приборах MASS-DIMM.

Турбулентные потоки воздуха под куполом телескопа, если не принять мер к их минимизации, также значительно ограничивают эффективность телескопа. Так, при разности температуры конструкции 2.5-м телескопа и окружающего воздуха более 5 градусов на 2.5-м телескопе не удастся получить качество изображения лучше 1 угловой секунды независимо от атмосферного качества изображения (которое может быть гораздо лучше). С 2018 года мы разрабатываем специальный прибор для измерения подкупольной турбулентности, условно называемый нами Domesat.

Реализуемый метод базируется на быстрой регистрации картины мерцаний от звезды в мнимом (виртуальном) зрачке телескопа расположенном в 2—3 км дальше от источника, чем поверхность земли. В качестве питающей оптики используется 2.5-м телескоп, что позволяет получать наиболее адекватную оценку влияния турбулентности на наблюдения с ним. Выходной зрачок строится с помощью линзы Фабри на детекторе.

В 2018 году были выполнены пробные измерения на 70-см телескопе АЗТ-2 и 2.5-м телескопе КГО. В 2019 году мы разработали узел однокоординатного позиционирования детектора на оптической оси с точностью 10 мкм, что необходимо для задания высоты сопряжения входного зрачка с точностью 5 м. Другим необходимым условием для установки зрачка является возможность фокусировки на его край, для чего нами было написано программное обеспечение, использующее методы машинного зрения.

В 2020 году был выполнен теоретический анализ возможного подхода к интерпретации измерений domesat в терминах цифровой фильтрации мерцаний регистрируемых двумерным детектором в плоскости выходного зрачка. Попутно были получены аналитические выражения полезные при рассмотрении мерцаний на круглых и квадратных апертурах. Статья с результатами этого анализа подготовлена к печати.

Важной дополнительной информацией для анализа подкупольной турбулентности являются измерения неравномерности прогрева башни телескопа. Эти измерения выполняются нами с 2018 года с помощью сети датчиков, смонтированных как на телескопе, так в здании башни.

В 2016-2020 в рамках сотрудничества с университетом им. Ататюрка в г. Эрзуруме, Турция нами был изготовлен прибор MASS-DIMM. В 2017-2018 гг прибор был собран и отъюстирован в г. Эрзуруме, после чего наши коллеги из университета Ататюрка начали измерения с ним на г. Каракая-Тепелери, неподалеку от строящейся башни 4-м телескопа, высота 3000 м н.у.м. Мы выполняем поддержку наблюдений и оценку адекватности получаемых данных.

Заключение

Важность исследований астроклимата: атмосферной турбулентности, прозрачности атмосферы и фона неба, общепризнана во всем мире. В ГАИШ МГУ эта тематика развивается уже несколько десятилетий и в последние несколько лет ее актуальность лишь возрастает в связи с вводом в строй 2.5-м телескопа Кавказской Горной Обсерватории. В рамках данной темы в 2016-2020 году нами были продолжены работы по развитию методики измерений профиля атмосферной турбулентности методом MASS-DIMM.

Практическая часть исследований выполняется на астроклиматическом мониторе (АСМ) КГО, основным инструментом которого является прибор MASS-DIMM. АСМ разработан нами как полностью автоматизированная система, поставляющая в режиме реального времени оператору 2.5-м телескопа следующую информацию: атмосферная экстинкция, фон неба, интегральное качество изображения. Также выполняются измерения профиля турбулентности и профиля ветра, в 2016-2020 году накоплено 396000 отдельных измерений (6600 часов), покрывающих практически полностью ясное ночное время. Практически непрерывные измерения с АСМ выполняются начиная с 2007 года, по представительности наш ряд измерений сравним с аналогичными рядами полученными на крупнейших обсерваториях, таких как Параналь, Сьерро Тололо.

В 2016 нами была завершена разработка метода оценки атмосферной экстинкции и фона неба по измерениям с MASS. В 2019 был выполнен анализ DIMM в рамках формализма весовых функций. Эта работа показала возможность реализации DIMM с помощью телескопа гораздо меньшей апертуры, чем обычно применяется. Так, возможен DIMM использующий два объектива диаметром порядка 5 см. Небольшой размер питающей оптики значительно ослабляет требования к несущей монтировке и открывает интересные возможности для полевых наблюдений. Соответствующие работы планируется продолжить в рамках подпроекта микроDIMM.

Мы планируем выполнить верификацию измерений с микроDIMM путем одновременных наблюдений с штатным прибором MASS-DIMM. Затем будут выполнены измерения под куполом 2.5-м телескопа, на разных высотах установки, на других вершинах северо-кавказского региона.

Максимизация эффективности большого телескопа также зависит от турбулентности генерирующейся под куполом. В 2016-2020 мы разработали прибор для измерения подкупольной турбулентности путем наблюдения распределения интенсивности в зрачке 2.5-м телескопа, сопряженного оптически на отрицательную высоту. Были выполнены пробные наблюдения. Также была смонтирована система мониторинга температур в башне 2.5-м телескопа.

Работы выполненные в рамках данной темы имеют большое прикладное значение для максимизации эффективности наземных астрономических наблюдений, в частности на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ.