Введение

После ввода в строй в последней четверти XX-го века Большого азимутального телескопа (БТА) с диаметром зеркала 6 метров, а затем и более крупных инструментов 8- и 10-метрового класса, наземная астрономия вступила в новую наблюдательную эру. Инструменты, устанавливаемые в фокусе большого телескопа, всегда признавались ключевым фактором, позволяющим астрономам достигать наблюдаемых пределов при изучении объектов неба. Наряду с собирающей силой, определяемой площадью зеркала, важнейшей характеристикой телескопов–гигантов нового поколения является достигаемое угловое разрешение. Основное ограничение астрономических инструментов по разрешению связано с фазовыми искажениями фронта оптической волны, возникающими в турбулентной атмосфере. Это — так называемая проблема "видения" через атмосферу. Исправление искажений может быть выполнено двумя способами: с применением адаптивной оптики или на основе постдетекторной обработки изображений.

Адаптивная оптика устраняет искажения волны с помощью устанавливаемых в световом пучке оптических компонентов, вносящих контролируемые дисторсии для компенсации атмосферного влияния. Однако в настоящее время этот способ коррекции фронта применим на больших телескопах только в инфракрасном диапазоне. Для видимой части спектра, где число степеней свободы при исправлении дисторсий волны становится нереализуемо большим, адаптивные оптические системы не созданы.

Дифракционное разрешение может быть реализовано в большом телескопе с использованием спекл-интерферометрических методов восстановления изображения. Спекл-структура изображения наблюдается в телескопе при коротких экспозициях вследствие интерференции света от отдельных участков волнового фронта. В основе идеи восстановления изображения, впервые предложенной и реализованной А.Лабейри (1970), лежит накопление серии короткоэкспозиционных изображений объекта и вычисление усредненного по всей серии спектра мощности. Из восстановленного спектра мощности можно извлечь информацию о диаметрах звезд и расстояниях между компонентами кратных систем звезд с пространственным разрешением, соответствующим дифракции на апертуре телескопа. Для 6-метровой апертуры D этот предел в области $\lambda = 500$ нм равен $1.22\lambda/D = 0.02''$ (20 миллисекунд дуги, мсд).

Спекл-интерферометрия является наиболее широко применяемым методом восстановления изображений с высоким угловым разрешением. Различные типы спекл-интерферометров используются в наблюдениях звезд, околозвездных оболочек, компактных газо-пылевых облаков и других объектов в видимом и инфракрасном диапазоне спектра практически на всех больших телескопах мира, включая и 10-метровые телескопы Кека в США.

6-метровый телескоп Специальной астрофизической обсерватории (САО) РАН остается одним из наиболее часто используемых для спекл-интерферометрии инструментов, что объясняется высокой стабильностью оптических передаточных характеристик его главного зеркала. Однако в 90-е годы точность, обеспечиваемая в наблюдениях на БТА спекл-камерой на основе сканирующей телевизионной системы (Балега и Рядченко 1984), перестала удовлетворять астрономов. Ее геометрическая нестабильность, низкий динамический диапазон и невысокая чувствительность не позволяли решать новые исследовательские задачи, такие как, например, изучение слабых звезд поздних спектральных классов. Создание спекл-интерферометра БТА на принципиально новой основе, обеспечивающего точность дифференциальных измерений положений компонентов кратных систем с ошибкой около 1 мсд и определения разности блеска между компонентами с точностью порядка 0.1 звездной величины, является актуальной научно-технической и методической задачей.

Цель диссертационной работы

Целью данной работы является разработка и внедрение в регулярные наблюдения на БТА спекл-интерферометра (СИ), размещаемого в главном фокусе телескопа, снабженного быстродействующей ПЗС-камерой, системой дистанционного управления и комплектом программ для регистрации изображений.

В наблюдениях на телескопе инструмент должен обладать следующими параметрами:

- проницающей способностью до 14^m при качестве атмосферных изображений около 1";
- возможностью изучения слабых объектов в диапазоне длин волн от 450 до 850 нм с относительной ошибкой порядка 1% для пар в диапазоне расстояний 50–300 мсд;
- динамический диапазон системы регистрации должен обеспечивать дифференциальные измерения разности блеска Δm между компонентами кратных систем звезд с ошибкой не хуже 0.1^m – 0.2^m , а для ярких объектов — до 0.05^m .

В ходе выполнения работы решались следующие задачи:

- анализ характеристик светоприемников и обоснование применения в СИ ПЗС-камер с быстрым считыванием;
- разработка основных блоков СИ, системы дистанционного управления и изготовление прибора в целом с последующим тестированием и исследованием точностных характеристик;
- компоновка системы регистрации изображений и выработка методики наблюдений на телескопах с использованием прикладных программ;
- апробация системы в наблюдениях звезд на разных телескопах, интерферометрические измерения двойных и кратных систем с различными характеристиками компонентов и сравнение результатов с данными других авторов.

Научная новизна

Предложен и реализован на двух телескопах новый аппаратный комплекс, позволяющий получать астрономические изображения компактных источников с дифракционным разрешением.

Обоснован и разработан приемник для регистрации мгновенных изображений, использующий докоммутационное усиление в многокамерном электронно-оптическом преобразователе, высокоэффективную оптику переноса и быстродействующую ПЗС-камеру. Показано, что данный приемник является оптимальным в задачах, связанных с восстановлением искаженных атмосферной турбулентностью изображений.

Разработаны алгоритмы и создан пакет программ для определения разности блеска между компонентами двойных и кратных систем по контрасту полос в среднем спектре мощности спекл-изображений. Массовые измерения дифференциальных звездных величин Δm по спекл-интерферометрическим данным выполнены впервые.

С применением системы на БТА и 1.52-м телескопе в обсерватории Калар Альто получено 780 новых измерений относительных положений 150 двойных и кратных звезд с точностями, в 2-3 раза превышающими достигнутые ранее.

Впервые продемонстрирована возможность реализации в спекл- интерферометрических наблюдениях разрешения 16 мсд, на 30% превышающего дифракционный предел 6-м апертуры.

Практическая ценность

- Созданный СИ может служить базовой моделью при проектировании и изготовлении приборов данного типа для интерферометрических исследований на других телескопах. Об этом свидетельствует опыт по установке интерферометра в фокусе Кассегрена на 1.52-м телескопе в обсерватории Калар Альто.

- Разработанные подходы и реализация способа дистанционного управления СИ могут быть полезны при автоматизации эксперимента с другими типами астрономических приборов.

- Полученные на БТА данные спекл-интерферометрических измерений используются для определения фундаментальных характеристик компонентов двойных систем.

Публикации и личный вклад автора

Основные результаты диссертации опубликованы в 7 работах:

- В работе 1 автору принадлежит разработка прибора для установки в фокусе Кассегрена 1-м телескопа, который послужил прототипом для создания новой системы. Автор также принимал участие во всех наблюдениях с этим прибором.

- В работе 3 автор участвовал в разработке аппаратуры и проведении эксперимента по получению изображений с использованием системы сегментации зрачка телескопа.

- В работах 2, 4, 5 автор принимал участие в наблюдениях и предварительной обработке данных, причем наблюдения на испанском 1.52-м телескопе обсерватории Калар Альто в основном выполнялись автором.

- В работе 6 автору принадлежит описание аппаратурной и методической части, а также участие в наблюдениях на БТА и предварительной редукции данных.

- В работе 7 автором выполнена основная часть работы по выбору концепции прибора, обоснованию его принципиальных решений, изготовлению и апробации на телескопе.

- Создание приемника для регистрации спекл-интерферограмм, разработка алгоритмов наблюдений и предварительной редукции материала также принадлежит автору.

Результаты, выносимые на защиту

- Разработка концепции, проектирование и изготовление спекл-интерферометра оптического диапазона для главного фокуса БТА и 1.52-м телескопа обсерватории Калар Альто.

- Результаты исследований технических параметров и точностных характеристик спекл-интерферометра БТА. Измерение звезд до 14 звездной величины с ошибкой по углу $\sigma_\theta = 0.2^\circ$, по расстоянию $\sigma_\rho = 1$ мсд и по разности блеска $\Delta m = 0.1$.

- Результаты 780 измерений 150 двойных и кратных систем на телескопах САО РАН и обсерватории Калар Альто, из которых 3 системы обнаружены впервые.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на семинарах
Специальной астрофизической обсерватории РАН,
Боннского института радиоастрономии, Германия,
Астрономической обсерватории г. Сантьяго де Компостелла, Испания, а также на:
Первой Всероссийской астрономической конференции
г. Санкт-Петербург, август, 2001 г.,
Коллоквиуме МАС N191 "Окружение и эволюция двойных и кратных звезд" в г. Мерида, Мексика, 2003.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 158 страниц текста, включая 65 рисунков и схем, 14 таблиц и список литературы из 82 наименований.

Во введении обсуждается актуальность работы, определены ее цели и основные задачи, научная новизна и практическая ценность, формулируются положения, выносимые автором на защиту. Здесь же кратко представлено содержание диссертации.

В первой главе кратко описан процесс формирования спекл-изображений в телескопе большого диаметра. Угловое разрешение идеального (без аберраций) телескопа ограничивается дифракцией на его апертуре и равно $1.22\,\lambda/D$ (классический критерий Рэлея). Для БТА эта величина равна 20 мсд при $\lambda = 0.5$ мкм. Температурные флуктуации в земной атмосфере вызывают фазовые и амплитудные искажения волнового фронта и снижают разрешение телескопа до 1–2". Спекл-структура изображений, регистрируемая с короткими экспозициями ($\tau \sim 10$ мс), вызвана интерференцией квазимонохроматических пучков, формируемых на отдельных участках апертуры. А.Лабейри в 1970 г. показал (1970), что для объектов с центральной симметрией распределение интенсивности может быть восстановлено по серии спекл-изображений вычислением среднего спектра мощности или автокорреляционной функции. В востановленном изображении сохраняются все пространственные частоты вплоть до дифракционной. Для изучения звезд и звездообразных источников методами спекл-интерферометрии было создано несколько поколений СИ: от самых первых приборов с регистрацией на фотографические пленки, до новых систем, использующих ПЗС-приемники и цифровую обработку сигнала.

Нами проанализированы характеристики инструментов, которые применяются в спекл-интерферометрии в настоящее время. Рассмотрены приборы, имеющие другие оптические схемы, прошедшие стадию испытаний, но не получившие распространения. Приведен обзор светоприемников для СИ и систем регистрации изображений в целом.

На основе анализа сделан вывод, что с точки зрения эффективности использования и точностных характеристик наилучшим решением для исследования кратных звездных систем является СИ с быстрой ПЗС-камерой в качестве приемника и усилителем яркости на многокаскадном электронно-оптическом преобразователе 1-го поколения. В данной конфигурации достигаются максимальные значения отношения сигнал/шум, динамического диапазона и проницающей способности.

Вторая глава посвящена разработке и созданию СИ для телескопа БТА. СИ состоит из трех основных частей: оптико-механического блока, светоприемника, системы накопления и обработки данных. В состав оптико-механического блока входят:

- микрообъективы для согласования масштаба изображения объекта с размерами элементов системы регистрации, имеющие увеличение от $2.5^{\times}$ до $32^{\times}$ и поле зрения от 26."5 до 2."1 соответственно;

- набор интерференционных фильтров с максимумами пропускания на длинах волн от 500 до 850 нм и полосами пропускания от 20 до 75 нм для получения квазимонохроматических пучков;

- призма компенсации атмосферной дисперсии, выполненная из разных сортов стекла и исправляющая хроматизм при наблюдениях в диапазоне зенитных расстояний от 5 до 60°.

Короткие экспозиции в интервале от 5 до 20 мс формируются с помощью затвора, управляемого импульсами ПЗС-камеры.

Разработанный нами светоприемник для регистрации спекл-интерферограмм включает:

- электронно-оптический 3-каскадный преобразователь 1-го поколения с электростатической фокусировкой, фотокатодом с диаметром 40 мм и коэффициентом усиления по свету $5{\cdot}10^4$;

- систему переноса изображения с экрана ЭОП на ПЗС-матрицу, состоящую из пары сопряженных светосильных (1:1.6) проекционных объективов с фокусным расстоянием 100 мм и масштабом переноса 1:1;

- быстродействующую ПЗС-камеру с матрицей формата 2/3", разрешением 1280×1024 и размером элемента 6.7×6.7 мкм, с термоэлектрическим охлаждением до $-15°$ С. Скорость считывания камеры до 8 кадров в секунду, шум считывания на уровне 7–8 e^-, тактовая частота опроса 12.5 МГц. Выходной сигнал из камеры представлен 12-разрядным кодом.

В систему накопления и обработки данных входит компьютер и четыре жестких диска емкостью по 70 Гб каждый.

Операции по перемещению оптических элементов, управлению камерой и изменению режимов аппаратуры производятся дистанционно из аппаратной. Высокая точность установки элементов (1–5 мкм) достигается применением механизмов линейного и кругового перемещений с приводом от двигателей постоянного тока с обратной связью по положению. Механизмы управляются от специализированного контроллера на базе микропроцессора, имеющего 9 режимов работы и определяющего одновременную работу шести устройств. Связь с камерой и оптическим блоком осуществляется по волоконно-оптической линии длиной 200 м и скоростью передачи информации 130 Мб/с через оптические 8-канальные приемо-передатчики.

В данной главе также дается описание процедуры наблюдений и интерфейса наблюдателя. Предложен метод калибровки масштаба изображения с помощью диафрагмы Гартмана, использующий интерференцию света от ярких звезд.

В третьей главе рассмотрены алгоритмы и методы, применяемые для определения позиционных параметров ρ и θ и разности блеска компонентов двойной системы Δm на основе анализа спектра мощности серии мгновенных изображений. Цифровому восстановлению изображений предшествует процедура предварительной редукции спекл-интерферограмм, включающая коррекцию темнового сигнала приемника, исправление неоднородности чувствительности по полю, чистку отдельных изображений от многоэлектронных сцинтилляций и селекцию изображений в зависимости от их положения в кадре. Параметры двойных звездных систем определяются с использованием классической процедуры Лабейри (1970), усовершенствованной нами для получения оценок разности блеска компонентов. Предложен также оригинальный метод исключения неопределенности в $180°$ при определениях позиционных углов θ. В качестве иллюстрации возможностей метода приведено восстановление изображения тройной звезды Kui 99.

В четвертой главе приведены результаты измерений двойных и кратных звезд, полученные на БТА и 1.52-м телескопе Калар Альто с применением СИ.

Программа наблюдений на БТА связана с изучением кратных систем, открытых астрометрическим спутником Гиппарх (ESA 1997). Большинство объектов программы — звезды низкой светимости в окрестностях Солнца. Созданный нами СИ в настоящее время является единственным инструментом, которому доступны интерферометрические измерения объектов слабее $8 - 9^m$ в видимом диапазоне. В координации с миссией Гиппарх и по другим близким по направленности программам нами выполнено 780 измерений кратных систем с дифракционным угловым разрешением. Измеренные растояния ρ заключены в диапазоне от 16 мсд до 1500 мсд. Средняя ошибка измерений составляет 2 мсд.

Динамические характеристики приемника позволяют обнаруживать пары с разностью блеска до $\Delta m = 3.7^m$. Высокая точность и достоверность выполненных на БТА измерений подтверждается вычисленными на основе наших спекл-интерферометрических данных параметрами орбит пар с быстрым относительным движением: HIP 689, HIP 4809, HIP 4849 и др.

У ряда систем впервые открыты третьи компоненты. В тройной системе HIP 25354 обнаружен слабый компонент около 14^m, что является рекордным результатом в оптической спекл-интерферометрии. Более яркие пары изучались с помощью аналогичного прибора в фокусе Кассегрена 1.52-м телескопа. Данные этих измерений используются в настоящее время для определения параметров орбит и вычисления масс компонентов двойных систем. Измерения, выполненные на БТА и 1.52-м телескопе при помощи СИ, включены в международные каталоги и базы данных и широко применяются астрономами различных обсерваторий.

В заключении подведен краткий итог работы по созданию СИ и приведены основные результаты и выводы.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. I.I. Balega, Y.Y. Balega, I.N. Belkin, V.A. Vasyuk, A.F. Maksimov: Television speckle interferometry of binary stars at the Zeiss-1000 telescope. - Astrofiz. Issl.(Izv. SAO) 35, 9-14, 1993

2. I.I. Balega, Y.Y. Balega, I.N. Belkin, A.F. Maksimov, V.G. Orlov, E.A. Pluznik, Z.U. Shkhagosheva, V.A. Vasyuk: Binary star speckle measurements during 1989-1993 from the SAO 6-m and 1-m telescopes in Zelenchuk. - Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 105, 503-506, 1994

3. Е.А. Плужник, Ю.Ю. Балега, В.А. Васюк, А.Ф. Максимов: Получение изображений с использованием системы сегментации зрачка телескопа. - Бюлл. САО, 44, 1997

4. I.I. Balega, Y.Y. Balega, A.F. Maksimov, E.A. Pluznik, Z.U. Shkhagosheva, V.A. Vasyuk: Binary star speckle measurements during 1992-1997 from the SAO 6-m and 1-m telescopes in Zelenchuk. - Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 140, 287-292, 1999

5. J.A. Docobo, V.S. Tamazian, Y.Y. Balega, J. Blanco, A.F. Maksimov, V.A. Vasyuk: Binary star speckle measurements at Calar Alto. - Astron. Astrophys., 366, 868-872, 2001

6. I.I. Balega, Y.Y. Balega, K.-H. Hofmann, A.F. Maksimov, E.A. Pluznik, D. Schertl, Z.U. Shkhagosheva, G. Weigelt: Speckle interferometry of nearby multiple stars. - Astron. Astrophys., 385, 83-93, 2002

7. А.Ф. Максимов, Ю.Ю. Балега, У. Бекман, Г. Вайгельт, Е.А. Плужник: Спекл-интерферометр 6-м телескопа БТА. - Bulletin SAO, v.55, 2003 (Препринт САО N182, 2003)