Спекл-интерферометр 6-м телескопа БТА

А.Ф. Максимов[a], **Ю.Ю. Балега**[a], **У. Бекман**[b], **Г. Вайгельт**[b], **Е.А. Плужник**[a]

[1] Специальная астрофизическая обсерватория РАН, п.Нижний Архыз, 369167, Россия
[2] Институт радиоастрономии им.М.Планка, Бонн, D-53121, Германия.

Аннотация.

Приведено описание спекл-интерферометра 6-м телескопа. Кратко рассмотрен принцип работы и назначение основных узлов. Дана информация о процессе наблюдений и первичной обработки данных. Приведена методика измерения параметров двойных звезд, оценки спектра мощности и восстановления изображений. Показано, что применение нового прибора дает возможность накапливать изображения со скоростью до 6 кадров/сек и наблюдать объекты до 12-й звездной величины с дифракционным разрешением телескопа ($0.''02$).

1 Введение

Изображения небесных объектов, получаемые с помощью наземных телескопов, искажены вследствие прохождения фронта световой волны через турбулентные слои атмосферы. В отличие от аберраций телескопа, эти искажения быстро и случайным образом меняются во времени. Влияние атмосферной турбулентности на качество астрономических изображений можно существенно ослабить, используя интерферометрические свойства телескопа, которые проявляются при экспозициях, сравнимых с временем замороженности фазовых искажений. сквозь атмосферу. Эта идея легла в основу классического метода спекл-интерферметрии (Лабейри, 1970). В основе метода лежит накопление серии короткоэкспозиционных снимков объекта и вычисление среднего по массиву спектра мощности изображений. Для "замораживания" фазовых искажений используются экспозиции от 0.01 до 0.1 сек в зависимости от состояния атмосферы, спектральной полосы фильтра и характеристик объекта. Условие сохранения когерентности в каждом отдельном изображении требует применения узкополосных интерференционных фильтров. Восстановление изображений возможно в пределах небольшой области изопланатизма, которая, как правило, не превышает $1 - 2''$.

Спектр мощности вычисляется суммированием двумерных Фурье-преобразований отдельных спекл-изображений. Для полного восстановления распределения яркости в объекте накапливаются спекл-интерферограммы точечного источника, который используется в качестве опорного при анализе спектра. Наблюдения точечного источника осуществляются в тех же условиях, что и основного.

В течение 20 лет на 6-м телескопе БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН проводятся регулярные спекл-интерферометрические наблюдения кратных звездных систем, измерения угловых диаметров звезд и изучение структуры ядерных областей галактик с предельным разрешением $0.''02$. За это время сменилось несколько поколений приборов, предназначенных для проведения исследований. В данной работе описан новый спекл-интерферометр (в дальнейшем СИ), разработанный в Лаборатории методов высокого разрешения. Краткое описание прибора можно найти на сайте http://www.sao.ru/mavr/speckle/si.htm. СИ применяется для исследований с дифракционным разрешением двойных и кратных звезд с целью определения угловых расстояний и позиционных углов. С его помощью также могут решаться следующие задачи:

- определение разности блеска между компонентами кратных звезд в выбранных спектральных полосах;
- измерение угловых диаметров и распределение яркости по диску ближайших звезд-гигантов;

• изучение малых тел Солнечной системы;
• исследование структур газо-пылевых оболочек на разных стадиях эволюции;
• исследования морфологии околоядерных областей активных галактик.

В статье приводится краткий обзор приборов для спекл-интерферометрии, дается описание основных узлов СИ, методики наблюдений, обработки и восстановления данных. Восстановление изображений проиллюстрировано на примерах нескольких кратных звезд.

2 Приемники и системы для спекл-интерферометрии

В СИ первого поколения изображение в фокусе телескопа регистрировалось на фотопленку. Световой поток предварительно усиливался электронно-оптическим преобразователем (ЭОП). Постобработка заключалась в просвечивании пленки излучением лазера в когерентно-оптических установках. Полученные спектры мощности затем измерялись на микрофотометре или координатно-измерительном устройстве (Дудинов и др., 1979). На крупных телескопах с помощью таких систем удавалось получать снимки звезд $7-8^m$. Недостатками этого процесса были трудоемкость и низкая точность измерений.

Для второго поколение СИ базой служили телевизионные приемники, работавшие в режиме счета фотонов. Применялись передающие трубки с большим внутренним усилением, обладавшие способностью накапливать слабый сигнал в течение долгого времени. Основная идея метода состояла в усилении фотоэлектронного изображения до такой степени, чтобы все вспышки от каждого регистрируемого фотона могли быть выделены из шумов считывания телевизионной камеры. Предварительное усиление изображений также достигалось с помощью ЭОП. Использовались как многокаскадные ЭОП, так и преобразователи на микроканальных пластинах (МКП). Усиление по свету достигало 10^6-10^8, что давало возможность наблюдать звезды вплоть до 13-й звездной величины. Часто вместе со счетчиками фотонов применялись цифровые корреляторы, вычислявшие автокорреляционную функцию в реальном времени. Это позволяло контролировать результат в процессе накопления и было серьезным преимуществом данного метода (Балега и др., 1981).

В 80-х годах для задач спекл-интерферометрии были предприняты попытки использования в качестве светоприемников координатно-чувствительных детекторов (КЧД) с резистивными и клинополосными электродами. Структура клиньев и полос подбиралась таким образом, чтобы осуществить кодирование положения центра фотонного события. Примером такого прибора является разработанная Тимоти (1983) MAMA-камера (multi-anode microchannel array) с системой кратных решеток для кодирования положений фотоэлектронов. Такие детекторы требовали очень высокого усиления, так как координатная точность обнаружения события зависит от значения сигнала в импульсе. Это достигалось применением ЭОП с тремя микроканальными пластинами (т.н. Z-конфигурация), но пространственное разрешение при этом падало до 60 мкм FWHM (Накаяма, 1989). При использовании одиночной МКП с искривленными микроканалами предельное разрешение составляло 14 мкм (Хорч, 1992), но усиление не превышало тогда 10^5-10^6 электронов. Попытки улучшить характеристики приборов этим путем приводили к их значительному усложнению и, как правило, к снижению надежности.

Несколько позже был разработан детектор с автокодированием, в котором осуществлялось прямое кодирование регистрируемых фотонов с помощью маски в коде Грея (Папалиолиос и др., 1985). Разрешение камеры PAPA (precision analog photon address), созданной на базе такого детектора, составляло 512×512 элементов по полю при максимальном потоке 5×10^5 фотоэлектронов/сек. Квантовая эффективность с фотокатодами фирмы VARO не превышала 2–3%. Несмотря на постоянное усовершенствование электроники камеры, реализовать стабильное равномерное поле пользователям этого прибора так и не удалось. Еще один существенный недостаток был связан с нелинейностью, которая возникает при регистрации близких фотонных событий. Эта нелинейность значительно ограничивает возможности последующего восстановления изображений с дифракционным разрешением.

Третье поколение СИ получило развитие в связи с появлением твердотельных приемников света. Среди них можно отметить самосканирующие диодные матрицы, матрицы на основе инжекции заряда и приборы с зарядовой связью (ПЗС). Последние к настоящему времени полностью вытеснили вакуумные приемники.

До 1997 года в САО РАН для наблюдений использовался СИ со светоприемником на базе телевизионной трубки (супервидикон) с разрешением 256×256 элементов. Присущие этому прибору недостатки — малое число элементов разложения, нестабильность электрических параметров, чувствительность к наводкам, невозможность дистанционного управления — ограничивали области его применения.

С другой стороны, усовершенствование ПЗС-приемников, появление точных электромеханических позиционеров и волоконно-оптических линий связи, а также развитие вычислительных средств позволило создавать приборы, свободные от указанных недостатков. Это послужило причиной к разработке и созданию новой аппаратуры, описание которой приводится ниже.

3 Спекл-интерферометр

В спекл-интерферометрии регистрировать астрономические изображения в узком спектральном диапазоне (∼20 нм для БТА) нужно с экспозициями, сравнимыми с временами замороженности атмосферных фазовых искажений (∼ 10 мс). Для согласования масштаба в фокальной плоскости телескопа с разрешающей способностью приемника изображение звезды увеличивается с применением дополнительной оптики. Сочетание больших увеличений, коротких экспозиций и узкой спектральной полосы наблюдений предъявляет высокие требования к чувствительности светоприемника. Для получения дифракционного изображения важными параметрами являются жесткость механической конструкции, точность установки оптических элементов, геометрическая и электрическая стабильность камеры, защищенность электроники и линий связи от внешних электромагнитных помех. Совокупность этих факторов определила конструктивные особенности оптического блока, систем управления и накопления нового СИ.

Во время наблюдений оптический блок СИ размещается на телескопе в кабине первичного фокуса согласно схеме компоновки, приведенной на рис. 1. Другая часть оборудования, включающая управляющий компьютер и систему накопления данных, устанавливается в аппаратной. Обе части связаны между собой опто-волоконными кабелями. Компьютер взаимодействует со всеми узлами системы через соответствующие интерфейсы. Управление производится с помощью клавиатуры компьютера и переключателей, расположенных на блоке управления.

Последовательность обработки светового потока от наблюдаемого объекта показана на оптической схеме прибора, которая приведена на рис. 2.

Изображение объекта в фокальной плоскости телескопа увеличивается микрообъективом (2), перед которым установлен затвор (1), определяющий время экспозиции. Интерференционный фильтр (3) выделяет из светового потока необходимую спектральную полосу. Световой пучок проходит через призму компенсации атмосферной дисперсии (4) и попадает на фотокатод электронно-оптического преобразователя (5). Усиленное по свету изображение с экрана ЭОП проецируется светосильными обективами (6) на матрицу ПЗС-камеры (8). Освещенность на матрице может регулироваться диафрагмой (7).

Рассмотрим наиболее важные узлы СИ.

3.1 Усилитель яркости

Для предварительного усиления света в СИ использован трехсекционный ЭОП первого поколения со встроенным источником вторичного питания, волоконно-оптическими входом и выходом и электростатической фокусировкой, снабженный системой автоматического ограничения яркости (система ABC). Он имеет 40–мм мультищелочной фотокатод типа S25 и желто-зеленый экран с люминофором P20. Квантовый выход ЭОП составляет примерно 8.3% на 545 нм, 6.4% на 610 нм и 1.7% на 800 нм, а максимальная разрешающая способность в центре ∼30 мм$^{-1}$. Кривые спектральной чувствительности фотокатода и относительные спектральные характеристики излучения люминофора приведены на рис. 4.

Коэффициент усиления по свету ($K_{\text{ус}}$) в диапазоне освещенностей на фотокатоде 10^{-4} – $3{\cdot}10^{-4}$ лк равен примерно 50000. Рабочий диапазон ЭОП ограничивается максимальной освещенностью $5{\cdot}10^{-4}$ лк. Работа с большими световыми потоками недопустима, так как это может вызвать изменение фотометрических свойств ЭОП. Устройство ограничения яркости устанавливает верхнюю границу свечения экрана на уровне 350 кд/м^2. Высокое напряжение для ЭОП (45 кВ) вырабатывается преобразователем напряжения, встроенным в корпус прибора. Для обеспечения необходимой точности преобразователь получает питание от стабилизированного источника компенсационного типа с выходным напряжением 6.75 В и током до 100 мА.

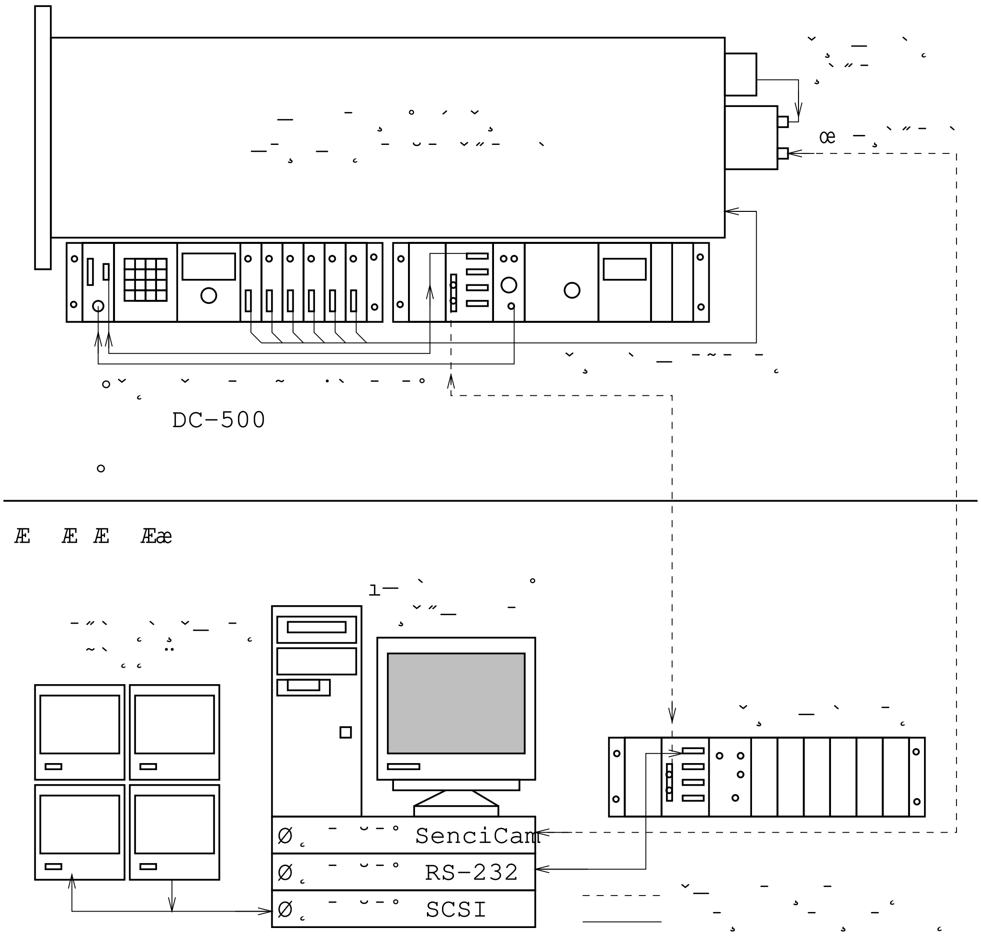


Рис. 1: Компоновка спекл-интерферометра.

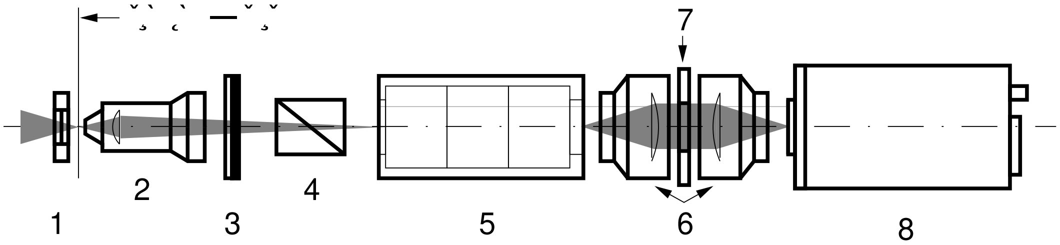


Рис. 2: Оптическая схема спекл-интерферометра.

3.2 ПЗС–камера

Светоприемник является конечным элементом цепи преобразования свет-сигнал. На его выходе в цифровом виде присутствует информация об объекте наблюдений. Кроме высокой чувствительности, он должен обладать однородностью по полю, достаточным динамическим диапазоном, малыми геометрическими искажениями.

В процессе работы по выбору светоприемника были проанализированы ПЗС-камеры фирм-производителей Dalsa, Proxitronic, Thompson, Oriel Instruments, PCO, EEV. Наиболее удовлетворяющим требованиям спекл-интерферометрии оказался прибор SensiCam 370LL фирмы PCO Computer Optics. Эта модель представляет собой охлаждаемую ПЗС-камеру, которая обеспечивает экспозиции от 100 нсек до 1000 сек и работает в спектральном диапазоне от 280 нм до 1000 нм. Камера имеет квантовую эффективность 53 % в области 530 нм (рис. 3), что находится в хорошем соответствии с максимумом иэлучения экрана ЭОП (рис. 4).

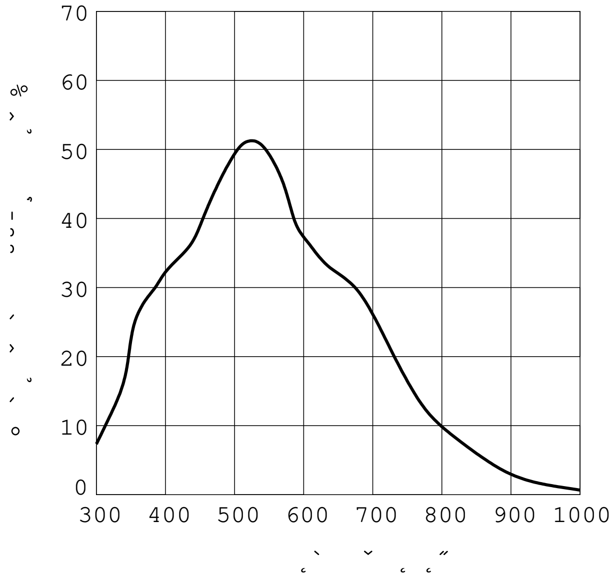


Рис. 3: Квантовая эффективность ПЗС камеры.

В качестве детектора излучения используется ПЗС-матрица ICX 085AL (SONY) с полнокадровым переносом изображения (Full Frame Progressive Scan Sensor). В SVGA-исполнении формат матрицы 2/3" и разрешающая способность 1280 × 1024 элементов. Каждый элемент представляет собой квадратную площадку со стороной 6.7 мкм. В камере реализован режим объединения элементов (binning) в вертикальном и горизонтальном направлениях в целях уменьшения шума считывания. Чтение матрицы производится с применением техники двойной коррелированной выборки (Quiet Correlated Double Sampling), что снижает шум считывания до 8–10 электронов при частоте опроса выходного регистра 12.5 МГц. Матрица снабжена двухступенчатым термоэлектрическим охладителем на элементах Пельтье, который устанавливает рабочую температуру -15°. Это уменьшает темновой ток, что, в свою очередь, позволяет увеличить время накопления.

Информация с камеры поступает на интерфейсную плату SensiCam в виде отдельных файлов, каждый из которых содержит один кадр изображения размером 512 × 512 элементов. Плата установлена в одном из слотов компьютера и взаимодействует с процессором по шине PCI. Время преобразования каждого кадра составляет 80 мсек. Учитывая время задержки, скорость записи кадров в системную память ограничена величиной 8 кадров в секунду. Еще одно ограничение связано со скоростью записи на диск по интерфейсу SCSI и быстродействием компьютера. Поэтому реальная скорость записи составляет не более 6 изображений в секунду.

Выходные сигналы камеры после АЦ-преобразования представлены 12-разрядным кодом и поступают на вход оптического интерфейса. Информация в компьютер передается по волоконно-оптическому кабелю длиной 400 м. Пропускная способность линии — 130 Мбайт/сек. Управление камерой произво-

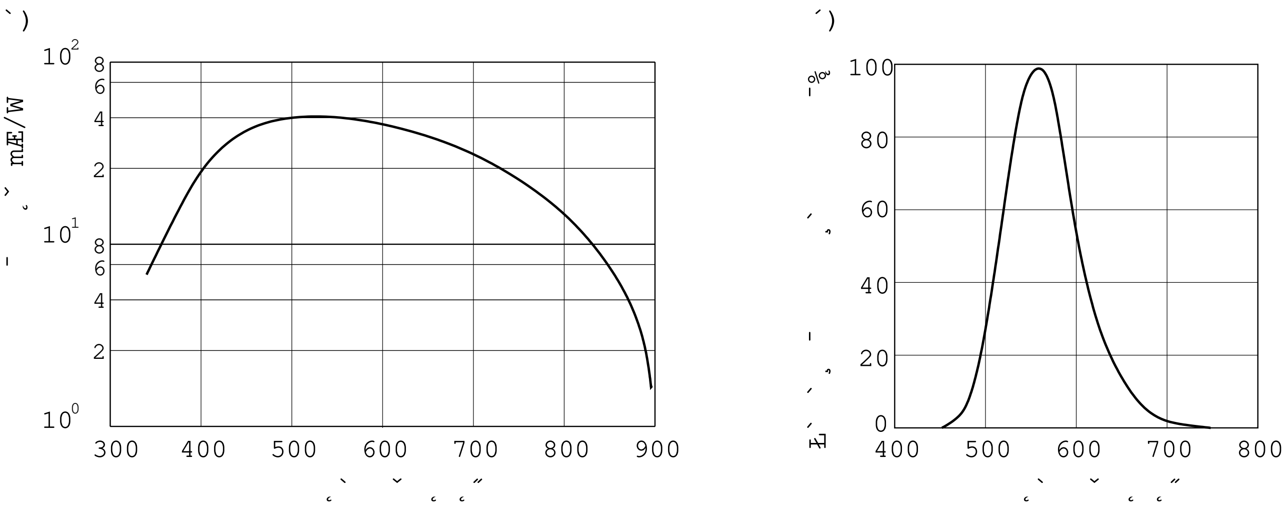


Рис. 4: Спектральная чувствительность фотокатода а) и спектральная характеристика излучения люминофора б).

дится согласно протокола обмена стандартного интерфейса RS-232.

3.3 Оптика переноса

Изображение с экрана ЭОП проецируется в масштабе 1:1 на ПЗС матрицу с помощью пары светосильных объективов фирмы Rodenstock(Германия), имеющих фокусное расстояние 100 мм и светосилу 1:1.6. Один из объективов установлен на столе линейного перемещения и может перемещаться в осевом направлении для точной фокусировки. В параллельный пучок между объективами вводятся диафрагмы, которые служат для ослабления светового потока при наблюдении ярких объектов. Диафрагмы выполнены в виде трех круглых отверстий с величиной светосилы соответственно 1:2.5, 1:4 и 1:8.

3.4 Согласующая оптика

В видимой области спектра предельная пространственная частота для 6 - метрового зеркала в первичном фокусе телескопа соответствует линейному масштабу 2 мкм. В соответствии с теоремой Найквиста

$$\nu_{max} = \frac{1}{2l}$$

, где l – расстояние между элементами ПЗС матрицы, необходимо обеспечивать разрешение не ниже 1000 мм$^{-1}$. При размере элемента матрицы ПЗС 13.4 мкм для получения информации о структуре объекта на дифракционном пределе необходимо более чем 20-кратное оптическое увеличение изображения объекта. Разрешающая способность системы регистрации в основном определяется разрешением ЭОП. На уровне 20% разрешение ЭОП составляет 20^{-1} мм, что видно из частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) системы ЭОП + ПЗС. (рис. 4) Точками показаны значения контраста, измеренные с эталона. Поле зрения спекл-интерферометра определяется характерным для БТА размером области изопланатизма и составляет $\sim 2''$. Поэтому применяемый для увеличения микрообъектив должен строить свободное от аберраций изображение участка неба с линейными размерами около 0.2 мм в фокальной плоскости телескопа.

В приборе используются серийные планапохроматические микрообъективы фирмы Karl Zeiss с задним рабочим отрезком 160 мм. Они размещены на столе линейного перемещения, который обеспечивает точность установки на ось прибора не хуже 2 мкм. Три микрообъектива дают увеличения $2.5^\times$, $20^\times$ и $32^\times$. В первичном фокусе телескопа при данных увеличениях поле зрения составит соответственно $23.''5$ (масштаб 0.048 $''$/элемент), $3.''07$ (масштаб 0.006$''$/элемент) и $1.''54$ (масштаб 0.0038$''$/элемент). При наблюдениях используется в основном $32^\times$ микрообъектив. $20^\times$ микрообъектив применяется в

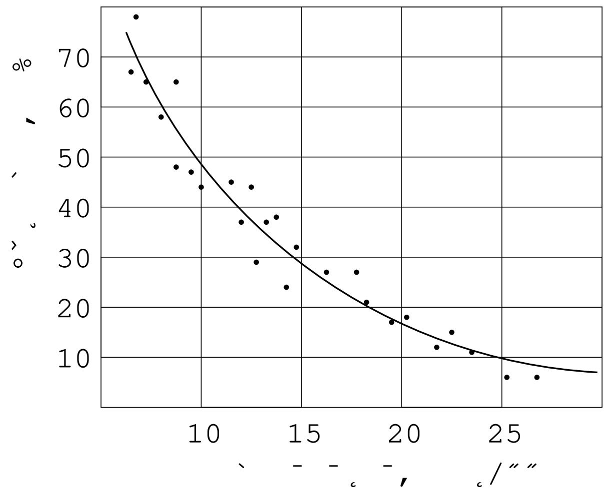


Рис. 5: ЧКХ системы ЭОП+ПЗС.

ночи с плохим качеством изображения, при наблюдениях предельно слабых объектов и широких пар двойных звезд. $2.5^{\times}$ микрообъектив предназначен для поиска объекта и установки на ось. Его применение позволяет обходиться без телевизионной камеры гидирования, поскольку ошибка наведения телескопа составляет не превышает $5''$.

3.5 Блок светофильтров

Формирование спектральной полосы для регистрации изображений осуществляется с помощью интерференционных светофильтров, которые размещаются на одном из двух столов кругового перемещения и последовательно вводятся в световой пучок поворотом колеса. Характеристики фильтров приведены на рис. 6. Наиболее часто используются фильтры на длину волны 545, 610 и 800 нм и полосой пропускания 30, 20 и 60 нм соответственно. На другом столе расположены нейтральные фильтры для ослабления света от ярких источников и устройства для проведения калибровок, настройки и исследования спекл-интерферометра.

3.6 Затвор

Для получения изображений с короткой экспозицией в СИ используется электромеханический скоростной затвор типа Uniblitz с входным отверстием 6 мм и максимальной частотой отработки 200 Гц. Затвор обеспечивает три рабочих экспозиции 5, 10 и 20 мсек. Момент открытия затвора синхронизирован с импульсом начала экспозиции камеры. Момент закрытия может выбираться наблюдателем в зависимости от задач и условий наблюдений. Имеется также возможность удерживать затвор постоянно в открытом или закрытом состоянии.

3.7 Компенсатор атмосферной дисперсии

Хроматизм земной атмосферы вызывает диспергирование изображения звезды в спектр, вытянутый в направлении к зениту. Величина дисперсии зависит от зенитного расстояния z объекта:

$$\Delta z = (n_b - n_r)\mathrm{tg}\, z, \tag{1}$$

где n_b и n_r – показатели преломления воздуха на коротко- и длинноволновой границах используемого участка спектра. При наблюдениях, например, на $z = 45°$ в полосе фильтра $\Delta\lambda = 20$ нм величина дисперсии в 3 раза превышает характерный размер спекла на $\lambda = 600$ нм. Для сохранения углового разрешения вдоль направления z атмосферная дисперсия должна быть скомпенсирована. В СИ исправление атмосферного хроматизма осуществляется с помощью призмы прямого зрения из пары склеенных клиньев, устанавливаемой в пучке f : 128 за объективом микроскопа. Призма вносит в изображение

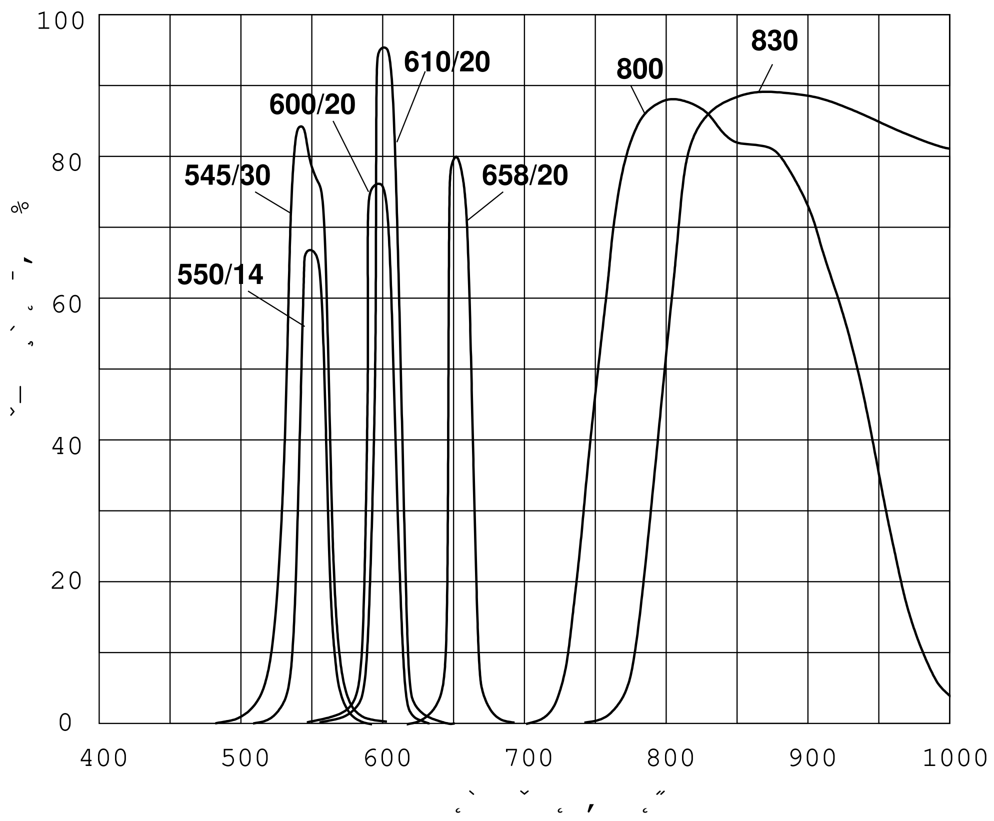


Рис. 6: Длины волн и полосы пропускания интерференционных светофильтров.

дисперсию, противоположную по знаку атмосферной. Коррекция осуществляется перемещением призмы вдоль оптической оси СИ в пределах рабочего отрезка от светофильтров до входа ЭОП (длина отрезка – 50 мм). Клинья призмы изготовлены из стекол SF L6 и La SF N30 с показателями преломления .....и ...... соответственно и склеены под углом 61°. Дисперсионная кривая призмы показана на рис. 7. Призма обеспечивает коррекцию атмосферной дисперсии в спектральном диапазоне 4000–9000 Å (в полосе 200 Å) в пределах зенитных расстояний 5°–60°. Калибровка положений призмы производится по наблюдениям ярких звезд на различных зенитных расстояниях. В наблюдениях установка призмы в расчетное положение выполняется автоматически по координатам звезды.

3.8 Привод электромеханических узлов

Электромеханические узлы СИ с установленными на них оптическими элементами управляются специализированным контроллером DC–500 фирмы OWIS (Германия). Контроллер обеспечивает 9 режимов работы и управляется от компьютера через стандартные интерфейсы RS–232 или IEEE–488. Предусмотрено также ручное управление электромеханическими узлами. Контроллер может управлять одновременно 6-ю идентичными исполнительными механизмами. Блок-схема управления одним из них приведена на рис. 8.

В состав контроллера входят следующие узлы.

1. Микропроцессорный блок — обрабатывает данные от компьютера и сигналы обратной связи от датчиков, формирует управляющие сигналы.

2. Блок установки режимов — задает параметры для работы, считывая данные с наборного поля.

3. Индикаторный блок — отображает введенные и текущие данные на LSD–дисплее 4×40 символов.

4. Усилители мощности (по одному на каждый механизм) — преобразуют логические сигналы от микропроцессорного блока в сигналы постоянного тока 24 В, 2 А для управления двигателями.

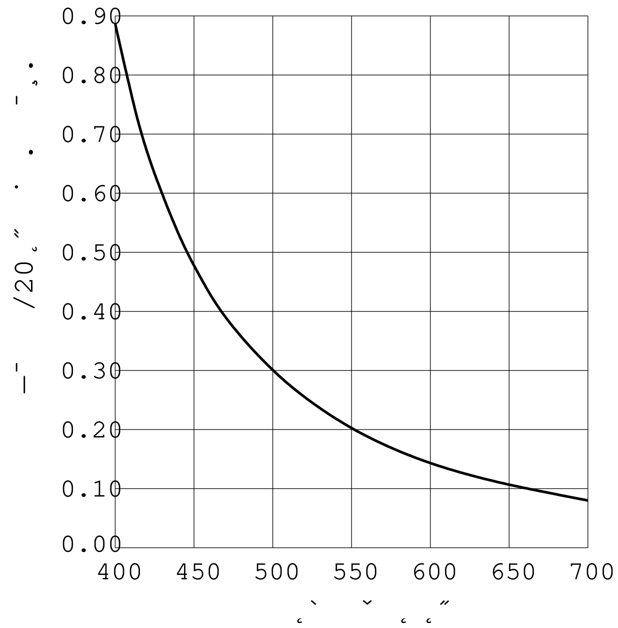


Рис. 7: Дисперсионная кривая призмы.

В качестве исполнительных механизмов используются высокоточные столы линейного и кругового перемещения, на которых размещены оптические элементы. Стол имеет:

- механическую часть, состоящую из корпуса, прецезионных направляющих, микрометрического винта и суппорта;
- двигатель постоянного тока;
- цифровой датчик обратной связи инкрементного типа, выдающий 500 импульсов на оборот с максимальной частотой опроса 100 кГц.

Механизм кругового перемещения отличается от линейного только механической частью, в которой вместо микрометрического винта установлена винтовая червячная пара. Точность установки оптических элементов — 2 мкм.

3.9 Конструкция

Все элементы оптической схемы размещены в цельнометаллическом корпусе, изготовленном из алюминиевого сплава. Для облегчения веса при сохранении приемлемой жесткости корпус имеет сплошное оребрение по внешней поверхности. К передней его части прикреплен фланец с центральным отверстием для установки прибора в фокусе телескопа. Для защиты от рассеянного света в корпусе имеются бленды и отсекающие экраны. Полная светоизоляция достигается установкой верхней непрозрачной крышки. В нижней части корпуса предусмотрены опорные стойки для крепления электронных блоков.

4 Наблюдения и первичная обработка данных

Первые наблюдения с описанной системой на БТА были проведены 20.12.1997 г. Были получены данные для нескольких двойных звезд, список которых приведен в таблице 1. Там же приведены спектральные полосы наблюдений. Было зарегистрировано от 300 до 2000 (в зависимости от яркости) мгновенных изображений каждой звезды. Атмосферное качество изображений при наблюдениях составляло в среднем $2.''8$. По отношению S/N в спектре мощности одиночной звезды были сделаны оценки квантового

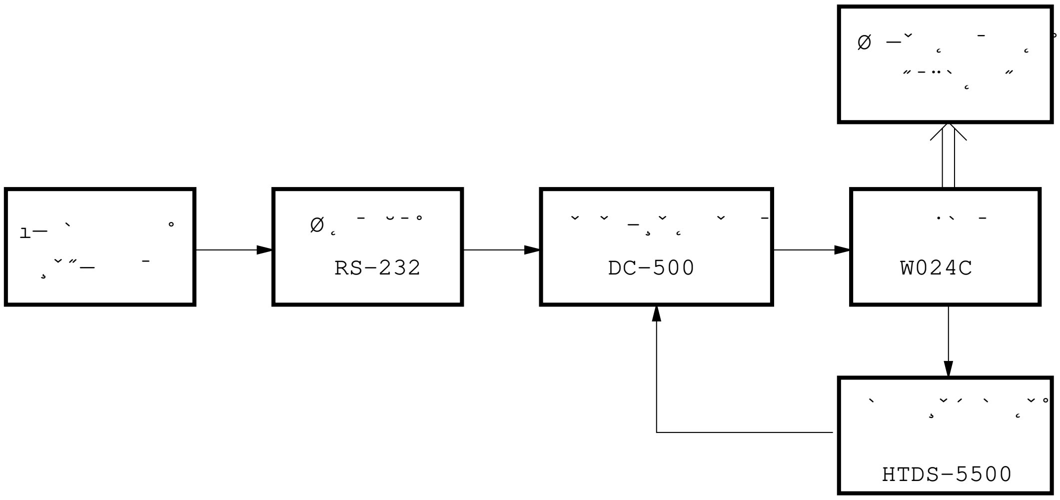


Рис. 8: Схема контроллера.

выхода системы. В разных частях спектрального диапазона значения данного параметра следующие: 1.5% на 780 нм, 3.9% на 610 нм и 5.2% на 545 нм. Это позволяет наблюдать объекты до 14^m в ночи с качеством изображения 1 ″(Балега и др., 2002).

Ниже приведены основные этапы первичной редукции мгновенных изображений.

1. Коррекция темнового сигнала.

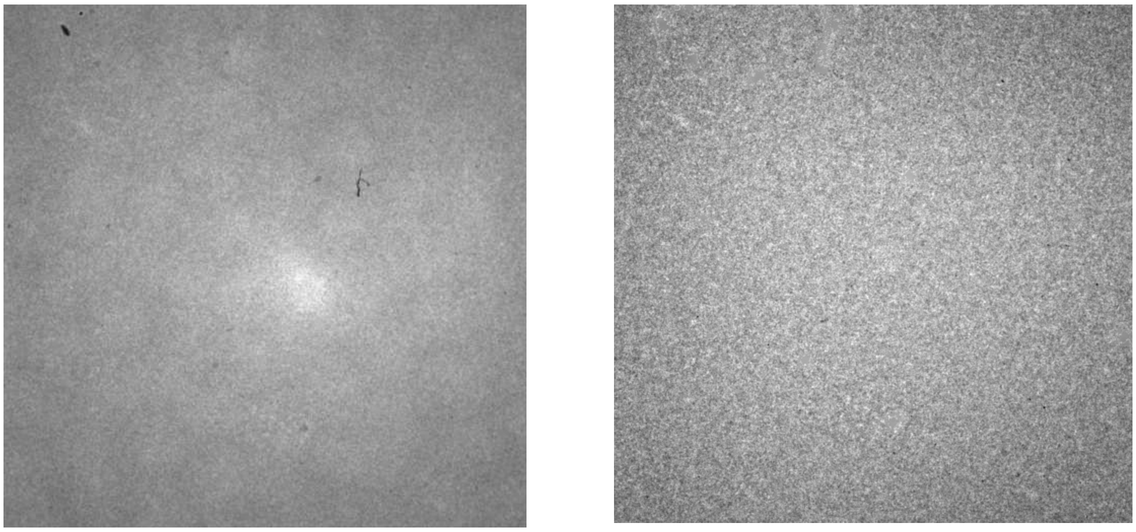
   Средний уровень темнового сигнала зависит от рабочей температуры камеры и при изменении последней от $-5°$C до $+20°$C этот параметр меняется от 80 до 105 отсчетов соответственно. Среднеквадратичная флуктуация сигнала составляет 0.25 (0.2%) по полю приемника и 2.1 (1.9%) от кадра к кадру. Дрейф уровня темнового сигнала не превышает 3 отсчетов (2.7%) в течение ночи при постоянной температуре.

2. Коррекция неоднородности чувствительности приемника по полю.

   Суммарная неоднородность чувствительности по полю включает в себя высокочастотную и низкочастотную составляющие. Первая определяется свойствами фотокатода ЭОП и характеризуется величиной около 5% в пределах рабочей области. Вторая вызвана общим понижением чувствительности по направлению к краям поля и достигает 20%. Кроме этого, на экране ЭОП присутствует шумовая компонента, обусловленная наличием следующих независимых факторов. Во-первых, выходная стекловолоконная шайба ЭОП имеет шестигранную структуру и в проходящем свете слабое изображение этой структуры присутствует в каждом кадре. Во-вторых, внутри ЭОП существует явление ионизации отдельных атомов. Образовавшиеся при этом ионы под действием электростатического поля устремляются к поверхности фотокатода. В результате соударения потоки фотоэлектронов, выбитые из фотокатода, рождают многоэлектронные события. Число таких событий зависит от светового потока на входе. Эти события концентрируются в центре ЭОП, поэтому в накопленном изображении они имеют вид пятна в центре поля (рис. 9 а). Указанные виды искажений устраняются путем накопления большого числа кадров при низкой освещенности на фотокатоде. Освещенность подбирается такой, чтобы в одном кадре не происходило наложение отдельных событий друг на друга.

   Искажения, обусловленные неоднородностью структуры выходной шайбы, формируются событиями с минимальной энергией. Многоэлектроника, наоборот, попадает в область событий с максимальной энергией. При накоплении уровни дискриминации ε_{min} и ε_{max} (рис. 10 б) выбираются по функции $\varepsilon P(\varepsilon)$, где ε – энергия фотоэлектрона, а $P(\varepsilon)$ – функция распределения фотоэлектронов по энергиям. В результате плоское поле становится свободным от искажений (рис. 9 б).

3. Чистка кадров от многоэлектронных событий.



`) ´)

Рис. 9: Кадр равномерной засветки до и после вычитания многоэлектронных сцинтилляций.

Многоэлектронное событие выглядит на экране ЭОП как яркая вспышка с интенсивностью, часто превышающей динамический диапазон камеры. При максимальном уровне одноэлектронного события ∼200–250 максимальная интенсивность многоэлектронного достигает 4095. Количество этих событий варьирует в широких пределах. При экспозиции 0.02 сек иногда не фиксируется ни одно событие в последовательности из 5–8 кадров, а иногда в каждом кадре присутствует более 5–10 событий. Такие события значительно искажают средние спектры мощности и биспектры серии мгновенных изображений объекта. Ионные события легко выделить по гистограмме отсчетов в серии изображений (рис. 10 а). Чистка заключается в замене отсчетов, соответствующих ионным событиям, на среднее значение сигнала в ближайшей окрестности такого события.

4. Селекция изображений по их взаимному положению в кадре.

   Из-за недостатков ведения телескопа часть изображений смещается на край поля приемника с потерей потока. Такие кадры в дальнейшем не анализируются, а их отбор осуществляется по дисперсии разности соседних изображений: $\int (I_2(\mathbf{r}) - I_1(\mathbf{r}))^2 d\mathbf{r}$. При последующей обработке имеет смысл работать не с каждым изображением, а с разностью соседних изображений.

Геометрические искажения нами не корректировались, так как в рабочей области дисторсия невелика (не превышает 1%) и не меняется во времени.

5 Оценка спектров мощности. Измерение параметров двойных звезд

В классическом варианте обработка спекл-изображений заключается в накоплении среднего спектра мощности (или автокорреляционной функции) серии мгновенных изображений объекта:

$$\langle |\widetilde{I}(\boldsymbol{\nu})|^2 \rangle = |\widetilde{O}(\boldsymbol{\nu})|^2 \langle \widetilde{S}^{(2)}(\boldsymbol{\nu}) \rangle + \widetilde{N}(\boldsymbol{\nu}), \tag{2}$$

где $\boldsymbol{\nu}$ – пространственная частота, $\langle |I(\boldsymbol{\nu})|^2 \rangle$ – средний спектр мощности серии мгновенных изображений, $|O(\boldsymbol{\nu})|^2$ – квадрат пространственного спектра объекта, $\langle |S(\boldsymbol{\nu})|^2 \rangle$ – передаточная функция спекл-интерферометрии (спектр мощности серии мгновенных изображений точечного источника), а $\widetilde{N}(\boldsymbol{\nu})$ –

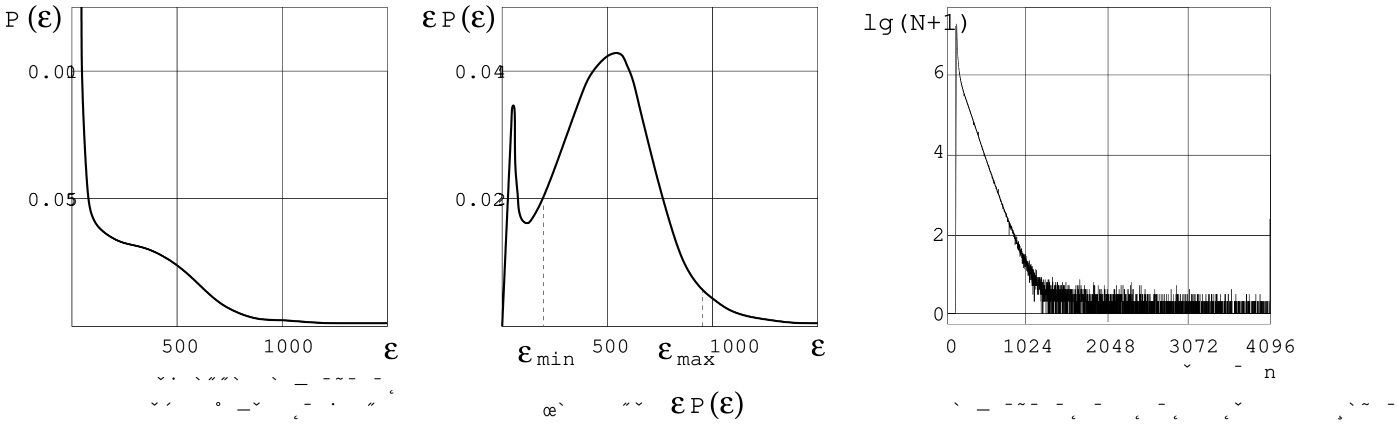


Рис. 10: Амплитудные распределения фотонных событий.

спектральная мощность шума. Для шестиметрового телескопа $D/r_0 \gg 1$ и первое слагаемое в (2) хорошо описывается известной двухкомпонентной моделью Корффа (Корфф, 1973):

$$\begin{aligned}\langle \widetilde{S}^{(2)}(\boldsymbol{\nu})\rangle &= \widetilde{T}_0^2(\boldsymbol{\nu})\mathrm{e}^{-6.88(\lambda\nu F/r_0)^{\frac{5}{3}}[1-(\lambda\nu F/D)^{\frac{1}{3}}]} + \\ & 0.435(r_0/D)^2\widetilde{T}_0(\boldsymbol{\nu}),\end{aligned} \tag{3}$$

где $\widetilde{T}_0(\boldsymbol{\nu})$ – передаточная функция безаберрационного телескопа. Получение несмещенной оценки квадрата пространственного спектра дифракционного изображения объекта $|\widetilde{O}(\boldsymbol{\nu})|^2\widetilde{T}_0(\boldsymbol{\nu})$ сводится таким образом к учету смещения оценки спектра мощности $\widetilde{N}(\boldsymbol{\nu})$ и коррекции низкочастотной составляющей спектра $|\widetilde{O}(\boldsymbol{\nu})|^2\widetilde{T}_0^2(\boldsymbol{\nu})\mathrm{e}^{-6.88(\lambda\nu F/r_0)^{\frac{5}{3}}}$, которая определяется атмосферой. Вклад низкочастотной составляющей значительно ослабляется при накоплении спектра мощности разности соседних изображений $\langle|\widetilde{I}_2(\boldsymbol{\nu}) - \widetilde{I}_1(\boldsymbol{\nu})|^2\rangle$. При этом автоматически учитывается темновой сигнал приемника и уменьшаются эффекты, связанные с послесвечением ЭОП.

В спектральную мощность шума $\widetilde{N}(\boldsymbol{\nu})$ основной вклад вносят две составляющие: шум считывания матрицы и фотонный шум (рис. 11). Шум считывания достаточно мал (дисперсия темнового сигнала составляет ∼2 отсчета). Его спектральная мощность оценивается по записи темнового сигнала и вычитается из спектра мощности серии мгновенных изображений. Спектральная мощность фотонного шума с точностью до нормировки совпадает с квадратом модуляционной передаточной функции (ЧКХ) приемника. ЧКХ достаточно стабильна во времени и определяется по записи кадров при равномерной засветке ЭОП. Квадрат ЧКХ приемника нормируется по среднему спектру мощности на частотах за пределами граничной частоты телескопа, где спектр полезного сигнала равен нулю и вычитается из среднего спектра мощности. Для коррекции искажений спектра мощности, оставшихся после вычитания фотонного смещения, мы пользовались итерационным алгоритмом, который учитывает то, что в пространстве автокорреляционных функций (АКФ) смещение оценок, вызванное фотонным шумом, локализовано преимущественно в начале координат. Алгоритм заключается в следующем. Введем весовую функцию

$$V(r) = e^{-\frac{r^2}{\sigma_m^2}}, \tag{4}$$

где r – расстояние от начала координат в плоскости автокорреляции, а σ_m – параметр, задающий ширину $V(r)$. Если $\langle\widetilde{I}_j^{(2)}(\boldsymbol{\nu})\rangle$ – очередная оценка спектра мощности серии мгновенных изображений, то следующая оценка средней автокорреляционной функции $\langle I_{j+1}^{(2)}(\mathbf{r})\rangle$ равна

$$\langle I_{j+1}^{(2)}(\mathbf{r})\rangle = \begin{cases} F_j(\mathbf{r}) & \text{при } F_j(\mathbf{r}) > 0, \\ 0 & \text{при } F_j(\mathbf{r}) \le 0, \end{cases} \tag{5}$$

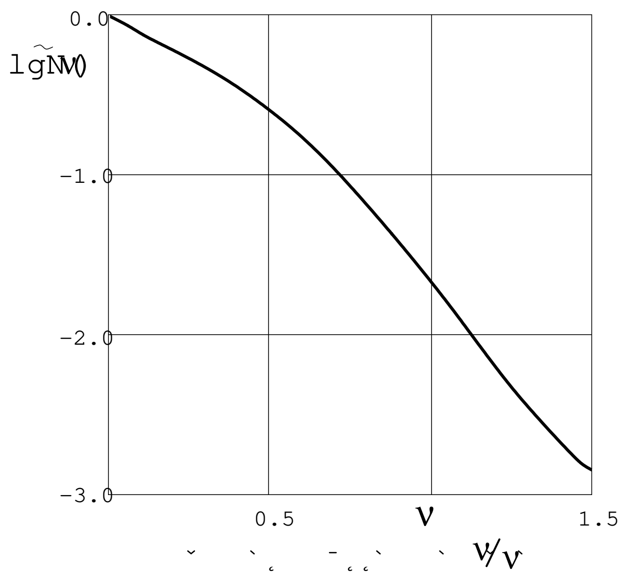


Рис. 11: Спектральная мощность фотонного шума.

где $F_j(\mathbf{r}) = V(r)\, I_j^{(2)}(\mathbf{r}) + (1 - V(r))\, \langle I^{(2)}(\mathbf{r})\rangle$, $I^{(2)}(\mathbf{r})$ – нескорректированная оценка средней автокорреляционной функции объекта (преобразование Фурье от нулевого приближения), а $I_j^{(2)}(\mathbf{r})$ – автокорреляционная функция, соответствующая спектру мощности

$$\widetilde{I}^{(2)}(\boldsymbol{\nu}) = \begin{cases} \langle \widetilde{I}_j^{(2)}(\boldsymbol{\nu})\rangle & \text{при } \nu < \nu_{\text{гр}}, \\ 0 & \text{при } \nu > \nu_{\text{гр}}. \end{cases} \qquad (6)$$

Преобразование Фурье функции $I_{j+1}^{(2)}(\mathbf{r})$ дает следующую оценку спектра мощности $\langle \widetilde{I}_{j+1}^{(2)}(\boldsymbol{\nu})\rangle$. В качестве нулевого приближения выбирается средний спектр мощности серии мгновенных изображений, из которого вычтена оценка спектральной плотности шума. Итерация последовательно проводится для возрастающей последовательности σ_m, принимающей значения от 0 (весовая функция равна 0 везде, кроме точки $r = 0$, где она равна 1) до максимального значения, которое определяется характерным размером зарегистрированного фотонного события. Переход от σ_m к σ_{m+1} происходит, когда разница между двумя последующими оценками средней АКФ не станет пренебрежимо малой. Описанный итерационный процесс сходится к положительной функции, которая практически совпадает со средней АКФ серии мгновенных изображений в области, где не проявляет себя смещение оценки, вызванное шумом. Спектр этой функции равен нулю за пределами граничной частоты телескопа.

Определение низкочастотной составляющей спектра мощности (1-е слагаемое в формуле (3)) сводится к аппроксимации средней АКФ объекта гауссовой функцией. Аппроксимация проводится по значениям АКФ в области, где интерференционная часть сигнала отсутствует. Остаточные АКФ корректируются с помощью алгоритма, аналогичного алгоритму исправления остаточных искажений при учете фотонного шума. На рис. 12 приведен пример оценки АКФ дифракционного изображения двойной звезды 53 Cam.

Эти АКФ использовались для определения параметров 18 двойных звезд, наблюдавшихся с новым СИ на БТА. Были взяты звезды-стандарты с медленным орбитальным движением и с расстоянием между компонентами от $0.''02$ до $0.''7$. В их число входили объекты с достаточно интересными характеристиками (41 Dra, 53 Cam, HIC 53070, DF Tau). С разрешением $0.''02$ восстановлены изображения самой тесной из них (41 Dra, $\rho = 0.''024$). Точность позиционных измерений для различных пар менялась в диапазоне $0.''001 - 0.''004$ по ρ и $0.^\circ 2 - 3^\circ$ по Θ в зависимости от яркости и качества изображения. Результаты измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1: Результаты измерений двойных звезд с новым спекл-интерферометром БТА

Название	Координаты 2000	Дата 1997.0+	Спектральный диапазон (нм)	ρ''	θ°
HBC 36	04271+2543	.9692	658/20		
ADS 3475	04512+1104	.9691	610/20	0.260	58.5
+22 0818	05056+2304	.9691	600/20	0.373	151.4
ADS 4660	06052+0708	.9691	610/20	0.457	42.7
ADS 4660	06052+0708	.9692	610/20	0.457	42.9
ADS 4950	06221+5922	.9692	610/20	0.689	139.9
+31 1684	07535+3038	.9695	610/20		
HR 3109	08017+6019	.9692	610/20	0.098	303.7
ADS 6578	08071+5407	.9693	610/20	0.412	206.1
ADS 6993	08468+0625	.9694	658/07	0.280	183.6
HR 3750	09278-0604	.9693	600/20	0.510	332.6
+11 2252	10367+1101	.9694	658/20	0.105	251.3
+21 2247	10515+2017	.9694	610/20		
+29 2110	11008+2913	.9693	610/20	0.210	108.5
ADS 8535	12238+5410	.9696	610/20	0.395	261.7
+10 2617	14025+0941	.9695	610/20		
41 Dra	18002+8000	.9696	610/20	0.024	341.2

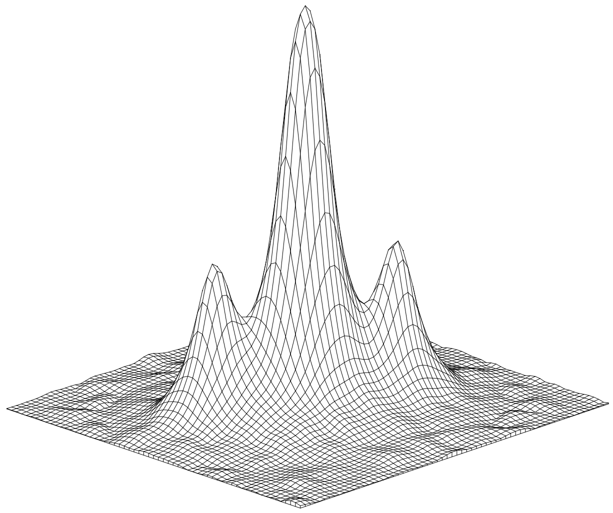


Рис. 12: Автокорреляционная функция двойной звезды 53 Cam.

Восстановление изображений

Для восстановления изображений с разрешением, которое определяется только дифракцией на апертуре телескопа, необходимо определить не только модуль $|\widetilde{O}(\boldsymbol{\nu})|$, но и фазу $\varphi(\boldsymbol{\nu})$ его пространственного спектра $\widetilde{O}(\boldsymbol{\nu}) = |\widetilde{O}(\boldsymbol{\nu})|\mathrm{e}^{i\varphi(\boldsymbol{\nu})}$. В настоящее время общепринятым способом получения фазы пространственного спектра является анализ корреляционных функций третьего порядка (или биспектров) серии мгновенных изображений объекта (Вайгельт, 1991). Несмещенная оценка среднего биспектра серии мгновенных изображений дается выражением (без учета среднего профиля фотонной вспышки):

$$\begin{aligned}\langle \widetilde{I}^{(3)}(\boldsymbol{\nu}_1,\boldsymbol{\nu}_2)\rangle \quad = \quad & \langle \widetilde{I}(\boldsymbol{\nu}_1)\widetilde{I}(\boldsymbol{\nu}_2)\widetilde{I}(-\boldsymbol{\nu}_1-\boldsymbol{\nu}_2)\rangle - \\ & C_1(\widetilde{I}^{(2)}(\boldsymbol{\nu}_1)+\widetilde{I}^{(2)}(\boldsymbol{\nu}_2)+ \\ & \widetilde{I}^{(2)}(-\boldsymbol{\nu}_1-\boldsymbol{\nu}_2)) - C_2 - \\ & \langle \widetilde{G}(\boldsymbol{\nu}_1)\widetilde{G}(\boldsymbol{\nu}_2)\widetilde{G}(-\boldsymbol{\nu}_1-\boldsymbol{\nu}_2)\rangle, \end{aligned} \tag{7}$$

где C_1 и C_2 – нормировочные постоянные (определяются по значениям биспектра при ν_1 или ν_2 или $|-\boldsymbol{\nu}_1-\boldsymbol{\nu}_2|$ больше граничной частоты телескопа), $\langle \widetilde{G}(\boldsymbol{\nu}_1)\widetilde{G}(\boldsymbol{\nu}_2)\widetilde{G}(-\boldsymbol{\nu}_1-\boldsymbol{\nu}_2)\rangle$ – средний биспектр шума считывания (определяется по записи темнового сигнала), а $\widetilde{I}^{(2)}(\boldsymbol{\nu})$ – несмещенная оценка спектра мощности серии мгновенных изображений объекта. Фаза среднего биспектра не искажается атмосферой и

$$\arg[\langle \widetilde{I}^{(3)}(\boldsymbol{\nu}_1,\boldsymbol{\nu}_2)\rangle] = \arg[\widetilde{O}(\boldsymbol{\nu}_1)\widetilde{O}(\boldsymbol{\nu}_2)\widetilde{O}(-\boldsymbol{\nu}_1-\boldsymbol{\nu}_2)]. \tag{8}$$

Восстановление фазы пространственного спектра объекта $\varphi(\boldsymbol{\nu})$ по фазе его биспектра $\arg[\widetilde{O}(\boldsymbol{\nu}_1)\widetilde{O}(\boldsymbol{\nu}_2)\widetilde{O}(-\boldsymbol{\nu}_1-\boldsymbol{\nu}_2)]$ проводится с помощью рекурсивной процедуры с последующим использованием алгоритма релаксации фазы (**?**).

Звезда hip25354 впервые разрешена астрометрическим спутником Hipparcos в 1991.25 как двойная. Спектральный класс K8, звездная величина 10^m37. После обработки результатов наблюдений 1999.81 в системе был обнаружен слабый 3-й компонент (на рис. 13 показан стрелкой). Так как разность блеска между компонентами системы значительна, на рисунке представлена АКФ объекта, а не спектр мощности.

Для двойной системы hip20227 спектрального класса G5 и m=8.7 разность блеска между компонентами $\Delta m = 3.6$. В этом случае также целесообразно привести в качестве иллюстрации не спектр мощности, а АКФ (рис. 14).

Возможности метода при восстановлении широких пар можно проиллюстрировать на примере обработанной двойной системы hip94960 спектрального класса M0 с визуальной звездной величиной 10.2. Расстояние между компонентами на момент разделения было равно $\rho = 0\overset{''}{.}479$ (рис. 15).

В качестве примера разрешения очень близкой пары звезд на рис. 16 приведен спектр мощности спектрально-двойной звезды chara126, класса G2III+F2N, звездной величины 5^m8. Расстояние между компонентами этой системы составляет $0\overset{''}{.}025$.

6 Заключение

Создание нового цифрового спекл-интерферометра позволило добиться кардинального улучшения метода. Необходимо отметить следующие достоинства описанной системы.

1. У нового прибора по сравнению с его прототипом значительно выше чувствительность, разрешающая способность и динамический диапазон.

2. Замена телевизионной камеры на базе вакуумной трубки ПЗС-системой позволила улучшить стабильность электрических параметров и воспроизводимость результатов.

3. Применение волоконно-оптических линий связи полностью устранило влияние внешних электромагнитных помех и повысило скорость передачи данных.

4. Переход от режима центрирования к полному АЦ-преобразованию кадра позволил устранить нелинейность регистрации близких фотонных событий, что имеет принципиальное значение для задач восстановления изображений.

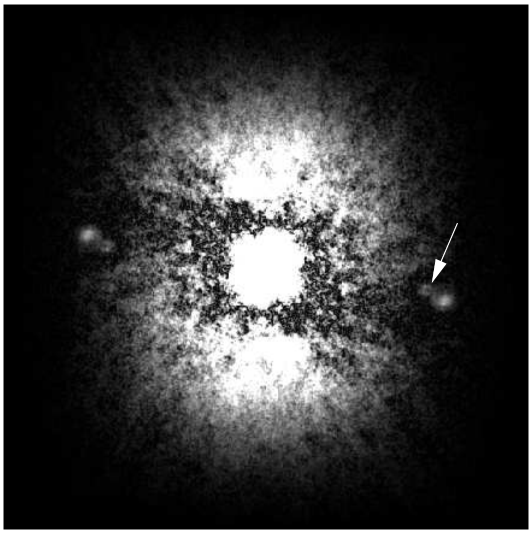


Рис. 13: Автокорреляционная функция hip25354.

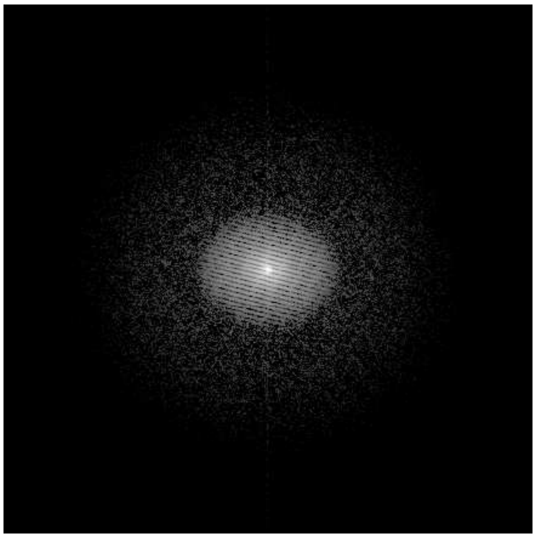


Рис. 14: Спектр мощности звезды hip20227.

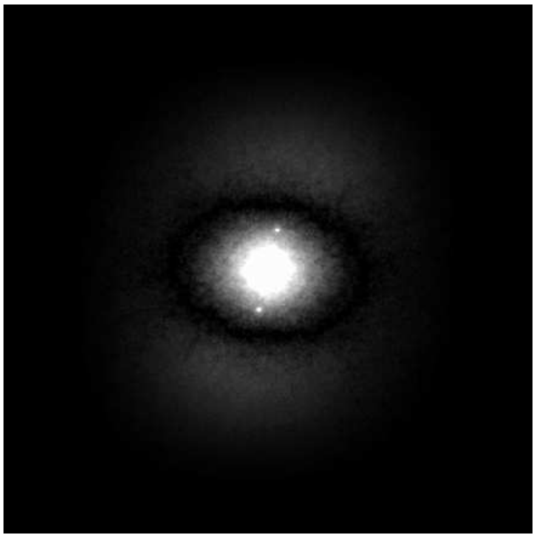


Рис. 15: Автокорреляционная функция объекта hip94960.

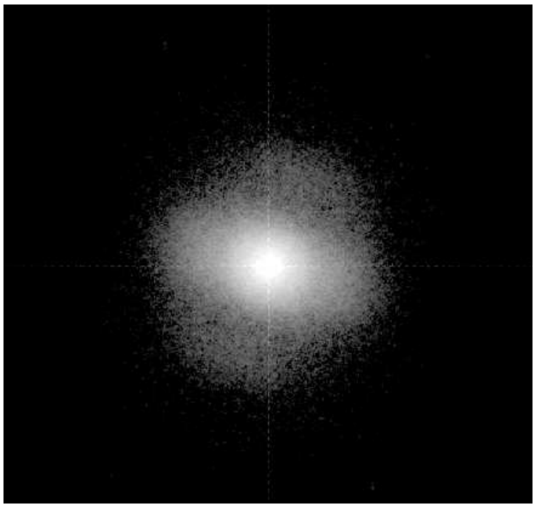


Рис. 16: Спектр мощности звезды chara126.

5. Работа при фиксированном высоком напряжении и минимальных настройках прибора упростила процедуру калибровок.

6. Устранена необходимость присутствия наблюдателя в первичном фокусе БТА в процессе наблюдений. Все операции по перемещению оптико-механических элементов и изменению режимов работы аппаратуры осуществляются дистанционно из аппаратной.

7. Юстировка и настройка прибора проводятся в лабораторных условиях.

Вместе с тем следует отметить, что еще не полностью решена проблема передачи данных на внешние носители. Под управлением программы SensiCam в операционной среде Windows95 скорость передачи не превышает 6 кадров/сек, при максимально возможном потоке от камеры 8 кадров/сек. При наблюдениях, в зависимости от условий записи информации на конкретный носитель, скорость еще более снижается и составляет 3–5 кадров/сек.

Список литературы

Балега Ю.Ю., Рядченко В.П., 1984, Письма в АЖ, **10**, 229
Балега Ю.Ю., Сомов Н.Н., Фоменко А.Ф. Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1981, **14**, 138
Балега и др. Speckle interferometry of nearby multiple stars., 2002, Astron. Astrophys.
Барнстедт и др. (Barnstedt J., Neri R., Grewing M.), 1987, Mitt. Astron. Ges., **68**, 240
Вайгельт (Weigelt G.), 1991, in: Progress in optics, ed. E. Wolf, 295
ДудиновВ.Н., Ерохин В.Н., Кузьменков С.Г., Рылов В.С., Цветкова В.С., Шабанов М.Ф., 1979, Докл. АН УССР, сер.А7, 550
Корфф (Korff D.), 1973, J. Opt. Soc. Am., **63**, 971
Лабейри (Labeyrie A.), 1970, Astron. Astrophys., **6**, 85
Мак-Алистер и др. (McAlister H.A., Hartkopf W.I., Hutter D.J., Franz O.G.), 1987, Astron. J., **93**, 688
Морган (Morgan J.S.), 1989, in: High Resolution Imaging by Interferometry, Garching, 381
Накайима и др. (Nakajima T., Kulkarni S.R., Gorham P.W., Ghez A.M., Neugebauer G., Oke J.B., Prince T.A., Readhead A.C.S.), 1989, Astron. J., **97**, 1510
Папалиолиос и др. (Papaliolios C., Nisenson P., Ebstein S.), 1985, Appl. Opt., **24**, 287
Тимоти (Timothy J.),1983 Optical detectors for spectroscopy, Publ. Astr. Soc. Pacific, **106**
Тимоти и др. (Timothy J.G., Morgan J.S., Slater D.C., Kasle D.B., Bybee R.L., Culver H.E.), 1989, in: SPIE Proc. Vol. 1158, Ultraviolet Technology III, ed. R.E. Huffman, Bellingham, 104
Токовинин А.А., 1988, Звездные интерферометры., Гл. ред. физ.-мат. лит., М.: Наука.
Уорли и Дуглас (Worley C.E., Douglass G.G.), 1992, in Complimentary Approaches to Double and Multiple Star Reseach (IAU Colloquium 135), eds. H.A. McAlister and W.I. Hartkopf, San Francisco, 583
Хорч и др. (Horch E., Heanue J.F., Morgan J.S., Timothy J.G.), 1994, Publ. Astr. Soc. Pacific, **106**, 992
Хорч и др. (Horch E.P., Ninkov Z., Van Altena W.F.), 1998, in: Proc. SPIE, **3355**, Optical Astronomical Instrumentation, ed. Sandro D'Odorico, 777