

УДК 520.36:520.22

СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТР 6-М ТЕЛЕСКОПА САО РАН НА ОСНОВЕ EMCCD: ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2009 А. Ф. Максимов¹, Ю. Ю. Балегга¹,
В. В. Дьяченко¹, Е. В. Малоголовец¹, Д. А. Растегаев¹,
Е. А. Семерников²

¹Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

²НИИ Многопроцессорных вычислительных систем, Южный федеральный университет, Таганрог,
347900 Россия

Поступила в редакцию 30 января 2009 г.; принята в печать 14 июля 2009 г.

Приведено описание спекл-интерферометра БТА на основе нового приемника с электронным умножением заряда в ПЗС-матрице. Основными оптическими компонентами прибора являются микро-объективы, интерференционные фильтры и призмы коррекции атмосферной дисперсии. ПЗС-камера PhotonMAX-512B на основе матрицы с обратной засветкой CCD97 обеспечивает запись на жесткий диск до 20 спекл-изображений форматом 512×512 элементов в секунду. При хороших качествах изображений новая камера благодаря высокой квантовой эффективности (93% в максимуме на 550 нм) и высокому пропусканию оптических элементов позволяет восстанавливать с дифракционным разрешением БТА (0.02") изображения звезд до 15^m. Рассмотрены основные преимущества новой системы в сравнении со спекл-интерферометром БТА предыдущего поколения.

Ключевые слова: *методы астрономических наблюдений, приборы и инструменты*

1. ВВЕДЕНИЕ

Повышение разрешающей способности наземных оптических телескопов остается одной из важнейших задач астрономии. Без внедрения новейших методов исправления фазовых искажений волновых фронтов, возникающих при прохождении света сквозь турбулентную атмосферу, достоинства крупнейших астрономических инструментов не могут быть полностью реализованы. Особое значение эта задача приобретает в связи с созданием гигантских телескопов нового поколения.

Приблизиться к дифракционному пределу углового разрешения телескопа позволяют адаптивная оптика и спекл-интерферометрия. Восстановление изображений в спекл-интерферометрии достигается накоплением серии коротковременных (время экспозиции 5–40 мс) изображений объекта с последующим вычислением среднего по ансамблю спектра мощности [1] и фазы объекта, определяемой по биспектру [2]. В отличие от адаптивной оптики, которая в настоящее время эффективна только в ИК-диапазоне, спекл-интерферометрия может применяться в наблюдениях в видимой области спектра и в ближнем ультрафиолете. Кроме того, спекл-интерферометрия реализуема и при относительно плохих атмосферных условиях, в то

время как для адаптивной оптики требуются только наилучшие изображения. Немаловажным является и то обстоятельство, что стоимость оборудования для спекл-интерферометрии весьма незначительна по сравнению с расходами на реализацию адаптивной оптики на большом телескопе.

За более чем 35-летнюю историю техника спекл-интерферометрии несколько раз кардинальным образом усовершенствовалась. На смену первым системам регистрации электронно-оптическими преобразователями (ЭОП) и кинокамерами на фотопленках [3] пришли телевизионные счетчики фотонов [4]. В 90-е годы телевизионные трубки были заменены быстродействующими ПЗС-матрицами [5, 6], при этом в качестве усилителей яркости по-прежнему использовались ЭОП разных типов. В последнее время на смену этим системам пришли новые ПЗС с электронным умножением сигнала — EMCCD (electron-multiplication CCD). Для применения в оптической интерферометрии они обладают рядом достоинств: возможность достижения одноэлектронной чувствительности при максимальной квантовой эффективности, высокая скорость считывания изображения, позиционная и фотометрическая стабильность.

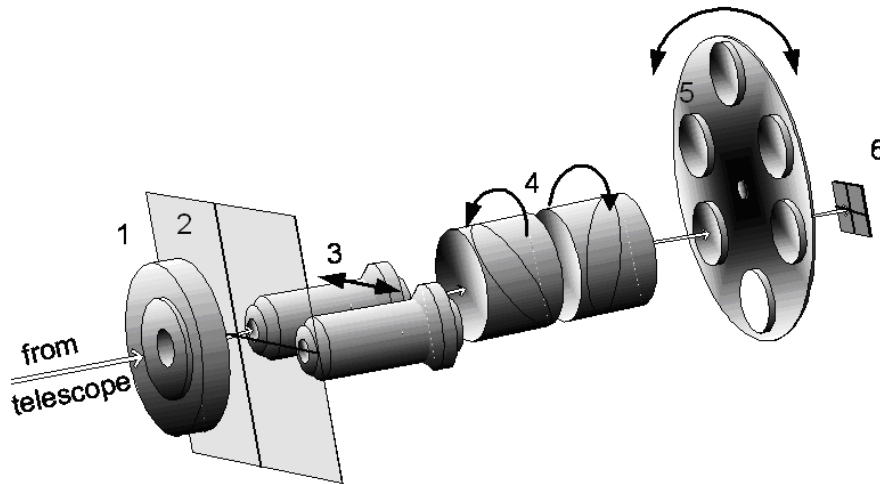


Рис. 1. Компоненты оптико-механического блока спекл-интерферометра БТА: 1 — затвор, 3 — сменные микрообъективы, 4 — призмы для компенсации атмосферной хроматической аберрации, 5 — набор интерференционных фильтров, 6 — EMCCD. Цифрой 2 обозначена фокальная плоскость телескопа. Черными стрелками показано направление перемещения компонентов.

В данной работе дано описание спекл-интерферометра (СИ) на основе EMCCD, который используется в наблюдениях звезд на 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории Российской Академии Наук (САО РАН) с 2007 г. В главе 2 даны основные характеристики оптических компонентов инструмента. Далее, в главе 3, описывается новый EMCCD-приемник. Система управления кратко представлена в главе 4. В завершение, в главе 5, по данным наблюдений двойных звезд даны оценки возможностей нового инструмента. Алгоритмы и программы восстановления изображений по серии коротковременных изображений будут описаны в отдельной работе.

2. ОСНОВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ

Основными элементами оптико-механического блока СИ являются (Рис. 1): электромеханический затвор с апертурой 6 мм для перекрытия светового потока от телескопа (1), микрообъективы для увеличения изображения объекта (3), набор призм для компенсации атмосферной хроматической аберрации (4), набор интерференционных фильтров для выделения узкой спектральной полосы (5). Пучок $f:4$ от главного зеркала БТА формирует изображение в фокальной плоскости (2) и, пройдя через все оптические элементы, регистрируется матрицей EMCCD (6). Рассмотрим более детально основные компоненты спекл-интерферометра.

2.1. Микрообъективы

Микрообъективы СИ предназначены для согласования масштаба изображения в фокусе БТА с размерами элемента приемника. Размер отдельного пятна в спекл-интерферограмме, соответствующий диаметру первого темного кольца дифракционного диска Эйри на длине волны λ , равен $d = 1.22\lambda/D$, где D — диаметр апертуры. В фокальной плоскости БТА соответствует длине волны $\lambda_0 = 550$ нм, $d = 2$ мкм. Размер элемента нашего приемника равен 16 мкм, и поэтому для восстановления профиля спекла, согласно теореме Котельникова ($f_{discr} \geq 2f_{max}$, где f_{max} — верхняя частота в спектре сигнала), изображение следует увеличить примерно в 20 раз. В СИ для согласования масштабов нами используются два высококачественных объектива производства фирмы “Carl Zeiss” с исправленной кривизной поля: 2.5-кратный ахроматический с числовой апертурой 0.08 и 16-кратный планахроматический с числовой апертурой 0.35. Они имеют задние рабочие отрезки 160 мм и формируют увеличенные, перевернутые и свободные от аберраций изображения звезд на матрице. При радиусе кривизны главного зеркала БТА $R = 48051 \pm 15$ мм (цеховые измерения Л. И. Снежко методом Гартмана) объективы обеспечивают в плоскости регистрации масштабы $3.44''/\text{мм}$ и $0.54''/\text{мм}$. Для приемника 512×512 элементов с размером фоточувствительной области 8.19×8.19 мм соответствующие масштабы со-

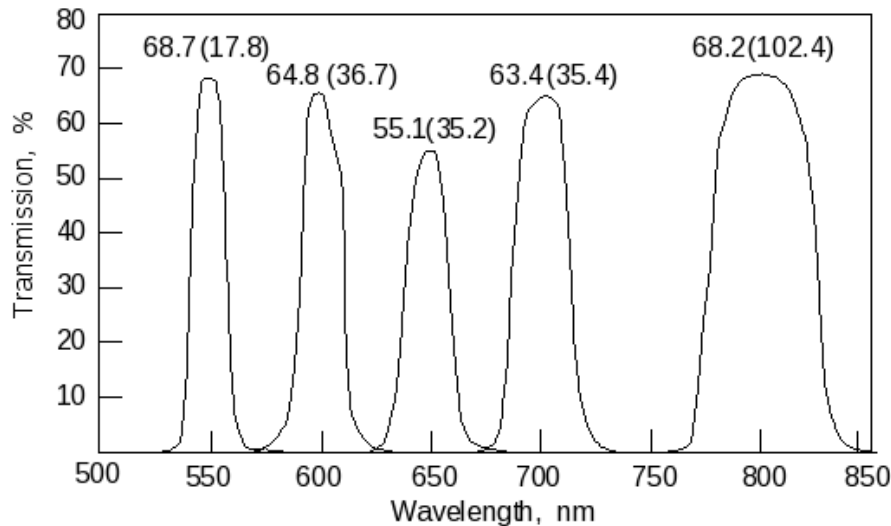


Рис. 2. Спектральные характеристики интерференционных фильтров. Над каждой кривой указаны пропускание в максимуме и полуширина (в скобках).

ставляют $0.0550''/\text{элемент}$ и $0.0087''/\text{элемент}$, что соответствует полю зрения $28.2''$ и $4.4''$. Основным рабочим объективом СИ является 16-кратный, в то время как малое увеличение используется в СИ только для наведения на объект и привязки позиционных углов.

Для некоторых задач, требующих получения детального профиля Эйри-диска, (например, для восстановления изображений видимых дисков звезд — холодных сверхгигантов) может понадобиться большее оптическое увеличение. Для таких случаев предусмотрена возможность установки микрообъектива с 32-кратным увеличением с соответствующим сокращением рабочего поля.

Малая сходимости пучка после 16-кратного объектива (1:64) позволяет устанавливать между ним и приемником другие оптические элементы (призмы, фильтры) без дополнительной оптики переноса.

2.2. Интерференционные фильтры

Для соблюдения условия когерентности при регистрации интерференционной картины ширина полосы пропускания фильтра $\Delta\lambda$ выбирается исходя из соотношения:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} < \frac{r_0}{D}, \quad (1)$$

где λ — центральная длина волны полосы пропускания фильтра, r_0 — радиус когерентности атмосферы [7], или

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} < \frac{2\pi}{\sigma_r}, \quad (2)$$

где σ_r — среднеквадратичная aberrация фазы входящей волны, выраженная в радианах.

При качестве изображений порядка $1''$ ($r_0 \approx 20$ см) фильтр для работы на БТА выбирается из соотношения $\Delta\lambda/\lambda \approx 1/30$. При ухудшении атмосферных условий допустимая полоса пропускания фильтра сужается. Однако в большинстве случаев без существенной потери информации спектральная полоса может быть расширена вдвое, что позволяет увеличить принимаемый поток. В ближней ИК-области могут применяться фильтры полушириной до 100 нм. Для специальных задач, связанных с выделением заданной полосы в спектре объекта, устанавливаются более узкие фильтры. К таким задачам, например, относится получение изображений мирид в полосах поглощения молекулой TiO и в близлежащем континууме.

В СИ пять интерференционных фильтров производства компании Andover (США) установлены на турели и вводятся в пучок поворотным механизмом. Все фильтры имеют диаметр 25 мм (световой диаметр 21.2 мм) и толщину 6 мм. Характеристики фильтров приведены на Рис. 2. Для обеспечения расчетных характеристик толщина диэлектрических слоев фильтров постоянна по всей поверхности с точностью до 0.25%. При проведении работ по калибровке светоприемника и тестированию системы в белом свете наличие фильтра в оптическом тракте не требуется. Для этого турель имеет дополнительное сквозное отверстие.

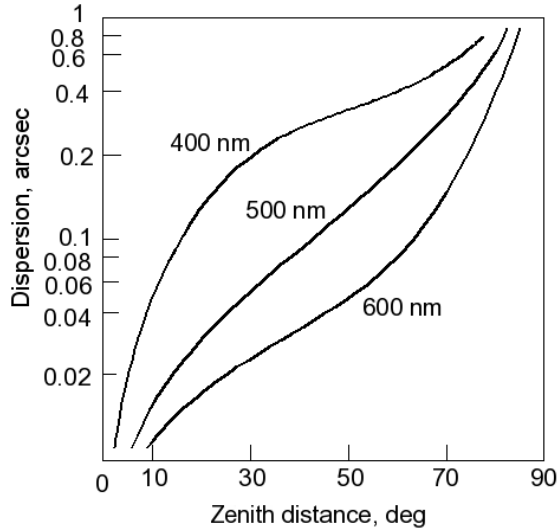


Рис. 3. Зависимость хода атмосферной дисперсии от зенитного расстояния для трех длин волн.

2.3. Компенсатор атмосферной дисперсии

Атмосферная дисперсия влияет на разрешающую способность спекл-интерферометрии даже при использовании узких интерференционных полос. Величина дисперсии может быть оценена по эмпирической формуле, предложенной Ламбертом еще в 1759 г.:

$$\frac{dz}{d\lambda} = -\frac{\tan z}{n_a} \frac{dn_a}{d\lambda}, \quad (3)$$

где n_a — показатель преломления атмосферы, z — зенитное расстояние объекта.

Для описания изменения показателя преломления с длиной волны чаще всего используется эмпирическое выражение Оуэнса [8]:

$$(n_a - 1) \times 10^8 = \left[2371.34 + \frac{683939.7}{(130 - \lambda^{-2})} + \frac{4547.3}{(38.9 - \lambda^{-2})} \right] D_s + \left[6487.31 + 58.058\lambda^{-2} - 0.71150\lambda^{-4} + 0.08851\lambda^{-6} \right] D_w, \quad (4)$$

где D_s и D_w — факторы, позволяющие учитывать плотность сухого воздуха и паров воды соответственно. Величина $n_a(\lambda)$ по формуле (4) может быть оценена с точностью до 10^{-7} — 10^{-8} . На Рис. 3 показана вычисленная по формулам (3) и (4)

зависимость атмосферной дисперсии в трех длинах волн от зенитного расстояния объекта для района установки БТА (давление 720 мбар, температура 0°C, относительная влажность 30%). Для примера: изображение точечного источника на $z=30^\circ$ при $\lambda=500$ нм будет смещено на $0.05''$ от истинного положения. Для области вблизи $\lambda=500$ нм при использовании фильтра $\Delta\lambda=20$ нм вытянутость спеклов по вертикали достигнет около $0.02''$, что сравнимо с размером кружка дифракции.

Простейшим способом исправления атмосферной хроматической аберрации может быть использование призмы прямого зрения, вектор дисперсии которой противоположен атмосферной дисперсии, а величина меняется в зависимости от зенитного расстояния. Следует иметь в виду, что в СИ используется 16-кратное увеличение изображения, поэтому корректор, который устанавливается после микробъективов, должен обеспечивать увеличенную во столько же раз дисперсию.

Отклонение α луча в призме с показателем преломления n и углом β равно

$$\alpha = (n(\lambda) - 1)\beta. \quad (5)$$

Для призмы, состоящей из склеенной пары клиньев с углами β_1 и β_2 и показателями преломления n_1 и n_2 отклонение равно

$$(n_1(\lambda) - 1)\beta_1 - (n_2(\lambda) - 1)\beta_2. \quad (6)$$

Задавая нулевое отклонение для $\lambda_0=550$ нм, получаем отношение углов клиньев:

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{n_1(\lambda_0) - 1}{n_2(\lambda_0) - 1}. \quad (7)$$

Для компенсации дисперсии атмосферы на максимальном зенитном расстоянии $z=60^\circ$ в полосе 20 нм на длине волны $\lambda_0=550$ нм имеем условие:

$$\frac{dz}{d\lambda} = \beta_1 \left(\frac{dn_1}{d\lambda} \right)_{\lambda_0} - \beta_2 \left(\frac{dn_2}{d\lambda} \right)_{\lambda_0}, \quad (8)$$

откуда получаем угол первого клина:

$$\beta_1 = \frac{\Delta z}{\Delta n_1 - \Delta n_2 \frac{n_1(\lambda_0) - 1}{n_2(\lambda_0) - 1}}, \quad (9)$$

где знак Δ означает изменение значений z и n для диапазона длин волн от $\lambda_0 - 10$ нм до $\lambda_0 + 10$ нм. Для исправления атмосферной хроматической аберрации на меньших z призма-компенсатор должна обеспечивать меньшую величину дисперсии.

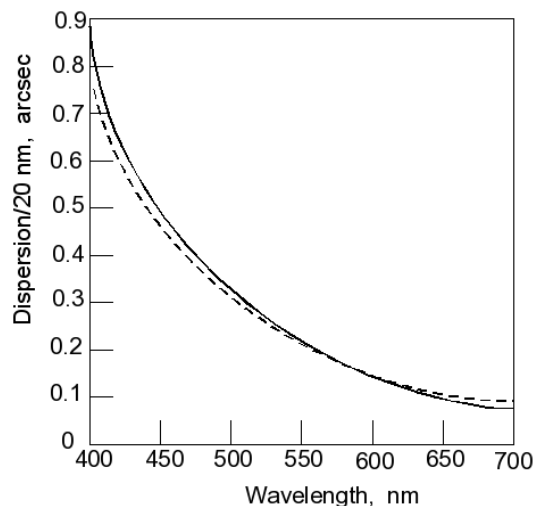


Рис. 4. Дисперсионные кривые призмы (сплошная линия) и атмосферы (штриховая линия).

В наблюдениях до сентября 2007 года компенсатор дисперсии был выполнен на основе призмы прямого зрения Амичи из пары клиньев. Величина дисперсии изменялась перемещением призмы вдоль оси прибора: наименьшая дисперсия получалась при ее установке в непосредственной близости от приемника, наибольшая — на максимальном удалении. Преимущество такой конструкции заключается в низких световых потерях в стекле и на поверхностях. Недостатком конструкции является остаточная дисперсия в околоразнозначной зоне, которая не может быть устранена, так как призма не может устанавливаться ближе некоторого минимального расстояния от плоскости регистрации изображения.

Дисперсионная кривая такой призмы в сравнении с дисперсией атмосферы показана на рис. 4. Видно, что подбором углов клиньев призмы и выбором показателя преломления стекол можно добиться совпадения хода дисперсий призмы и атмосферы в диапазоне 550–700 нм.

Новый компенсатор построен на основе призмы прямого зрения Рисли, состоящей из двух идентичных призм, вращающихся вокруг оси инструмента в противоположных направлениях (см. Рис. 1). Компенсатор вносит дисперсию $2\gamma \sin(\theta/2)$, где γ — дисперсия одной призмы, θ — угол разворота призм. Каждая призма является склейкой пары клиньев (крон + флинт) с тщательно подобранными показателями преломления и обеспечивает дисперсию $330''/20$ нм на длине волны прямого зрения 550 нм. Лучи большей и меньшей длины волны отклоняются в разные стороны от луча 550 нм.

Механизм вращения обеих призм выполнен зависимым и предполагает только разворот призм на равные углы относительно оптической оси, что упрощает конструкцию. Угол разворота призм задается компьютером после выбора объекта и определения зенитного расстояния. Калибровка зависимости $\theta(z)$ выполнена по ярким звездам, наблюдавшимся на разных z в ночи с хорошими изображениями.

Вследствие разной удаленности призм от приемника (передняя призма находится на большем расстоянии и дает большую дисперсию) суммарный вектор дисперсии призм отклоняется от вертикали на угол, который зависит от зенитного расстояния. Остаточная незначительная дисперсия может быть скомпенсирована поворотом системы призм на незначительный угол (около 10°) в противоположном возникающей дополнительной дисперсии направлении.

Компенсатор Рисли из пары вращающихся призм обеспечивает исправление атмосферной хроматической аберрации спекл-интерферограмм в пределах зенитных расстояний от 0° до 60° . Призмы изготовлены компанией V.Halle Nachfolger GmbH (Берлин, Германия) из крона SF L6 и тяжелого флинта LaSF N30. Углы клиньев из крона и флинта равны, соответственно, $\beta_1=41.6^\circ$ и $\beta_2=41.9^\circ$. Поверхности призм имеют 5-слойное просветляющее покрытие в диапазоне 450–1100 нм.

3. ПРИЕМНИК

3.1. Общие характеристики

Приемником в СИ является камера PhotonMAX-512B, разработанная компанией Princeton Instruments на основе матрицы CCD97 с внутренним умножением заряда (EMCCD). Матрица имеет квантовую эффективность $QE=93\%$ в области 550 нм. Кривая эффективности матрицы на разных длинах волн показана на Рис. 5. При формате матрицы 512×512 элементов размером 16×16 мкм фоточувствительная область составляет 8.19×8.19 мм.

Выходной узел ПЗС выполнен в виде двух независимых регистров считывания. Один используется при считывании сигнала, как в обычных ПЗС-системах, другой работает в режиме электронного умножения заряда. При работе в режиме без умножения (нормальный режим) среднеквадратичное значение шума считывания составляет $45 e^-$ и $60 e^-$ при частотах считывания 5 и 10 МГц соответственно. При максимальном умножении шум считывания падает до значений ниже $1 e^-$. Коэффициент умножения может программно задаваться

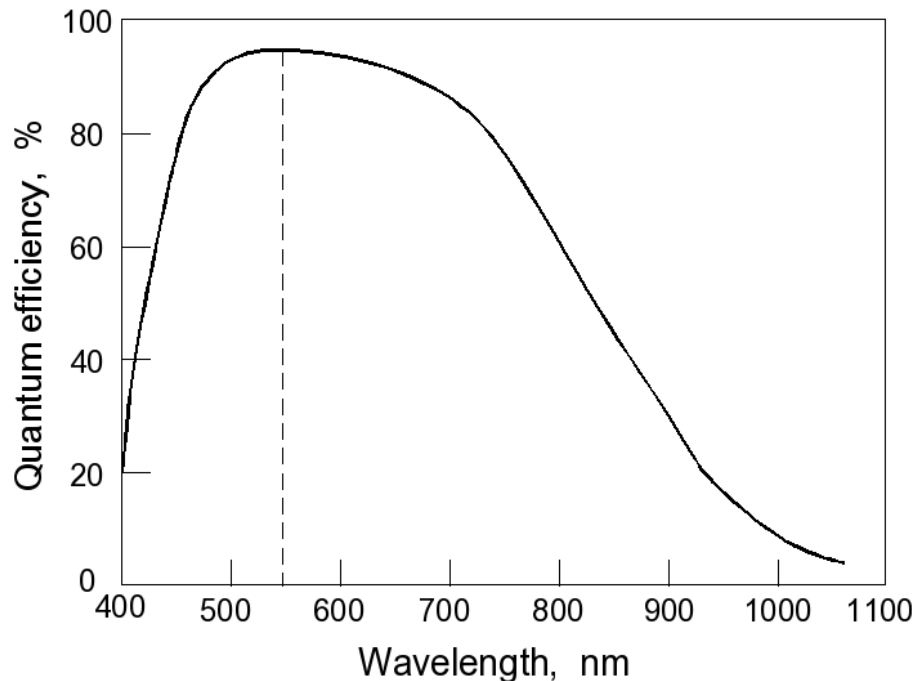


Рис. 5. Паспортная кривая квантовой эффективности матрицы CCD97. Штриховой прямой отмечена длина волны, соответствующая максимуму квантовой эффективности 93%.

в диапазоне от 1 до 1000. Зависимость величины умножения (напряжения на фазе умножительного регистра) от управляющего 16-разрядного кода цифро-аналогового преобразователя близка к экспоненциальной (Рис. 6). Максимальное значение усиления достигается при напряжении примерно 43 В на фазе умножительного регистра матрицы. Дальнейшее повышение этого напряжения может привести к разрушению матрицы. При наблюдениях обычно используется режим максимального умножения, и только при регистрации наиболее ярких объектов коэффициент умножения снижают или переходят в нормальный режим.

Для уменьшения темнового тока матрица охлаждается четырехкаскадным холодильником на элементах Пельтье. Требуемая температура задается и поддерживается с точностью ± 0.05 °С с помощью следящей системы с обратной связью. Минимальная рабочая температура составляет -70 °С. Темновой ток при этом снижается до величин ниже 0.01 $e^-/с$ на элемент разрешения.

Матрица с теплоотводящими элементами размещена в вакуумированном модуле. Светочувствительная поверхность матрицы отделена от внешней среды только одним входным стеклом, благодаря чему сокращаются световые потери на отражениях. Эффективный отвод тепла от горячей поверхности термоэлектрического охладителя осуществляется с помощью вентилятора внутри корпуса камеры.

Для уменьшения вибраций элементов камеры вентилятор закреплен на специальном демпфирующем подвесе.

Камера может работать в режиме кадрового переноса в широком диапазоне экспозиций от 10 мкс до 10 мин. Максимальная скорость считывания при полнокадровом режиме составляет 29 кадров в секунду. Матрица имеет внутренний электронный затвор, поэтому отпадает необходимость в использовании высокоскоростного электромеханического затвора, определяющего время экспозиции. Последний используется только как прерыватель светового потока, например, для накопления темного сигнала.

3.2. Временная стабильность

Для проверки фотометрической стабильности приемника его характеристики изучались как в лабораторных условиях, так и на телескопе. Они включали измерения спектральной кривой квантовой эффективности приемника вместе с оптическими элементами СИ, стабильности системы, ее быстродействия в разных режимах накопления, однородности сигнала по полю, отклика системы на равномерную засветку.

В спекл-интерферометрии обычно накапливается серия из нескольких тысяч коротковременных изображений. Общее время накопления такого массива не превышает нескольких минут — при

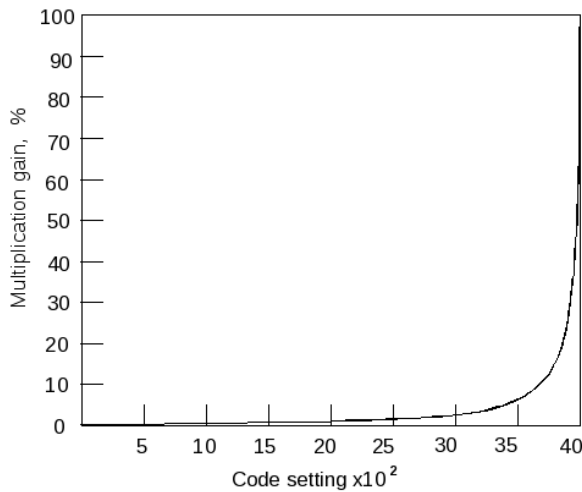


Рис. 6. Зависимость умножения в матрице CCD97 от кода на входе цифро-аналогового преобразователя.

больших временах меняется оптическая передаточная функция атмосферы. Для проверки стабильности выходного сигнала матрицы нами было накоплено несколько рядов по 1000 изображений с экспозицией по 10 мс в условиях равномерного освещения матрицы постоянным световым потоком при частоте считывания 10 МГц. Изменение суммированного по всей матрице сигнала в кадре представлено на Рис. 7. Видно, что за время записи 1000 кадров (54 сек) интенсивность сигнала с матрицы изменяется экспоненциально почти на 10%. Это обстоятельство необходимо учитывать при фотометрических измерениях. Для выхода на стабильный уровень усиления матрица должна до начала основной экспозиции объекта считываться не менее 5 минут.

3.3. Скорость считывания изображения

Независимо от задаваемой экспозиции максимальная скорость считывания изображений полного формата 512×512 элементов в камере PhotonMAX-512B составляет 29 кадров в секунду. Увеличение скорости считывания может быть реализовано путем объединения (биннинг) элементов 2×2 , 4×4 , 6×6 или уменьшением зоны считывания. Зависимость скорости считывания от биннинга при разных зонах считывания матрицы показана на Рис. 8. Максимальная скорость 350 кадров/с достигается при сканировании $1/64$ части площади матрицы и биннинге 6×6 элементов. Однако все виды биннинга редко применяются в спекл-интерферометрии из-за потерь высоких пространственных частот в изображении.

3.4. Отклик на равномерную засветку и темновой сигнал

При равномерном освещении матрицы ПЗС (“плоское поле”) получаемое изображение не является идеально ровным. Неоднородности отклика приемника объясняются разными причинами:

- неоднородностью структуры кристалла;
- загрязнением и неоднородностью на поверхности защитных стекол камеры;
- недостатками электроники считывания сигнала с матрицы, проявляющимися в основном в краевых зонах.

В спекл-интерферометрии неравномерности “плоского поля” приемника не играют такой важной роли, как при получении прямых снимков с большими экспозициями или в спектроскопии, так как усредняются не отдельные кадры, а их энергетические спектры. Тем не менее, стандартная процедура редукиции в спекл-интерферометрии также предполагает коррекцию каждой спекл-интерферограммы путем деления на “плоское поле”.

Мы изучали отклик системы на равномерную засветку накоплением сигнала от сумеречного неба. Один из результатов, на котором усреднены 2000 коротковременных изображений, приводится на Рис. 9. Неравномерность сигнала по полю (дисперсия отсчетов) для данного изображения составляет 0.5%. Усреднение большего числа таких реализаций позволяет определить отклик PhotonMAX-512B на равномерную засветку с дисперсией шума меньше 0.05%.

Измерения сигнала камеры в отсутствие засветки (bias) выполнялись при экспозиции 10 мкс и закрытом затворе. На Рис. 10 показано усреднение 500 кадров при максимальном усилении. Слева показан общий вид подложки, справа — ее трехмерная модель. По углам раstra указаны величины накопленных зарядов в отсчетах аналогово-цифрового преобразователя. Видно, что первые строки в начале кадра имеют значительно большую интенсивность за счет натекания заряда. Максимальная разница в отсчетах составляет 0.6% от полного значения разрядной сетки преобразователя (65536). Смещение полностью вычитается из исходного изображения, если темновой сигнал накоплен в условиях, полностью идентичных условиям регистрации основного массива спекл-изображений.

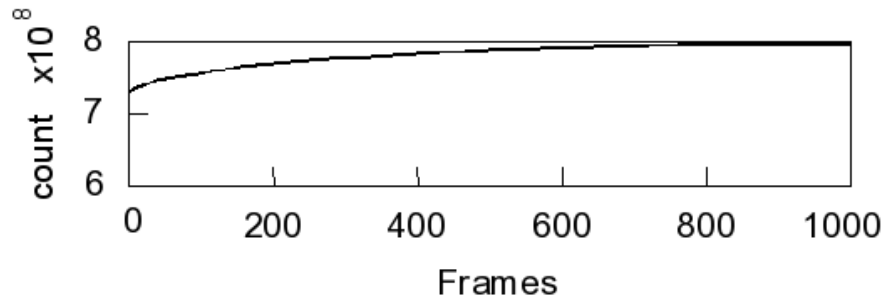


Рис. 7. Изменение сигнала с матрицы со временем в условиях постоянной засветки.

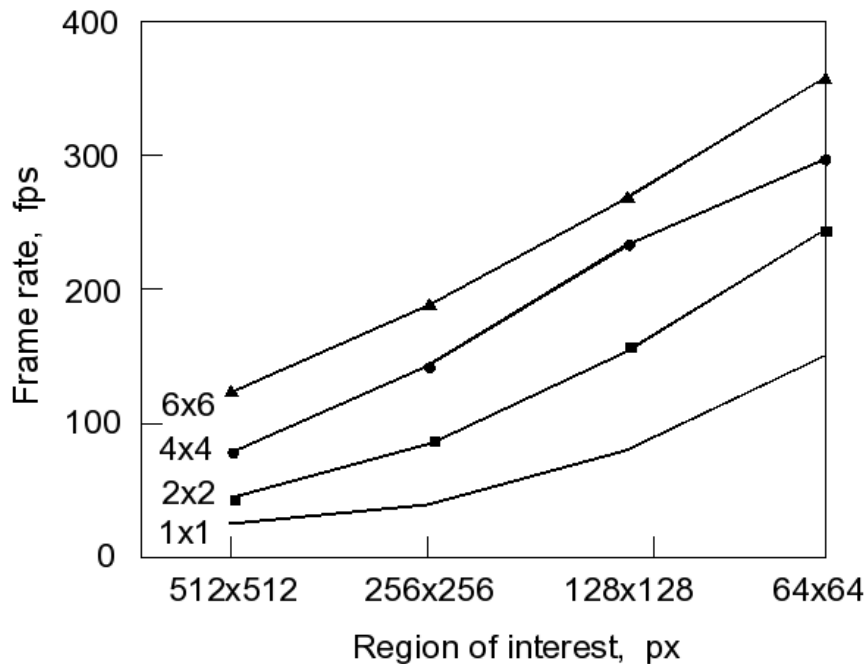


Рис. 8. Зависимость скорости считывания изображений от размера зоны сканирования матрицы без биннинга - 1×1 и биннинге 2×2, 4×4 и 6×6. По оси абсцисс отложены размеры области считывания.

3.5. Одноэлектронная чувствительность

При спекл-наблюдениях слабых звезд камера PhotonMAX-512B регистрирует коротковременные изображения с максимальным усилением в режиме счета отдельных фотонов. На Рис. 11 показано изображение звезды LkHA 198 ($m_V=14.3$), полученное с 20-мс экспозицией в фильтре 600/40 нм при изображениях около 1". На разрезе вдоль произвольного направления видны пики интенсивности, соответствующие отдельным фотонным событиям. Средняя дисперсия шума матрицы составляет 30–40 отсчетов. Отдельные фотонные события детектируются приемником с отношением сигнал/шум в диапазоне от 10 до 50.

4. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Схема управления системой показана на Рис. 12. Управление оптическими элементами СИ производится от контроллера шагового привода ТМСМ-310 компании Trinamic. Он может управлять тремя двухфазными шаговыми двигателями через драйверы ТМС246 с максимальным током нагрузки до 1.5 А. Встроенный микропроцессор (μP) вместе с энергонезависимой памятью (EEPROM) емкостью 16 КБ с помощью модуля задания параметров ТМС428 позволяет проводить гибкую настройку привода под конкретный механизм перемещения. Контроллер подключается к СОМ-порту управляющего компьютера посредством стандартного интерфейса последовательного обмена RS-232 через волоконно-оптические 8-канальные преобразователи LWL.

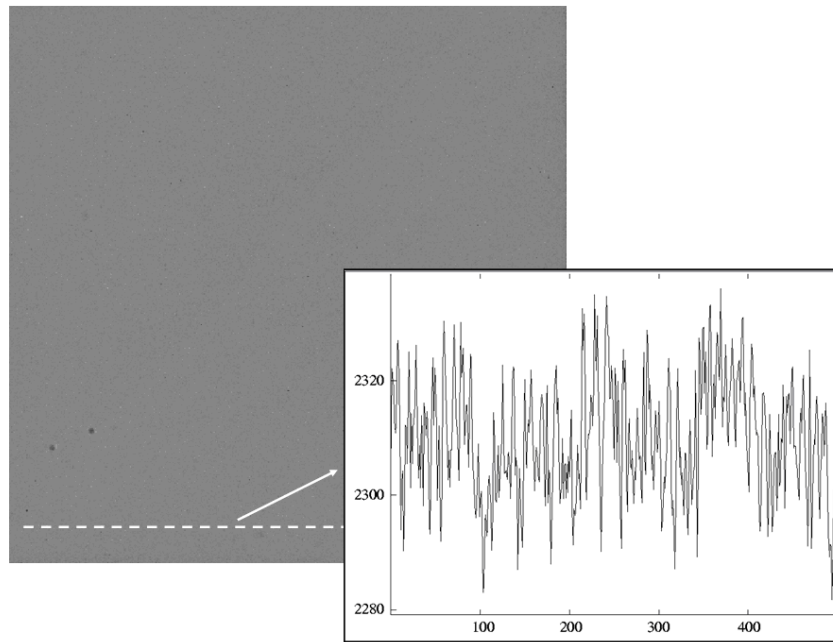


Рис. 9. Накопленное по 2000 кадров изображение небольшого участка сумеречного неба (“плоское поле”). Справа приводится сечение вдоль одной из строк в нижней части кадра.

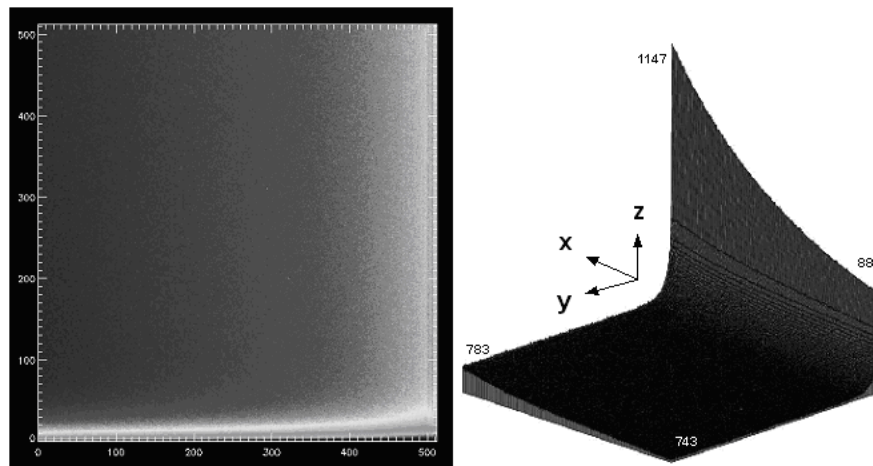


Рис. 10. Вид подложки матрицы и ее трехмерное представление.

Микрообъективы перемещаются линейным позиционирующим механизмом типа ERLIC-85 фирмы OWIS (Германия). Точность установки составляет 2 мкм на 50 мм длины подвижной части.

Турель с интерференционными фильтрами закреплена на механизме кругового перемещения DMT-65. Точность установки фильтра в пучок составляет 0.01° . Призмы компенсации дисперсии приводятся во вращение дифференциальным механизмом и приводом от шаговых двигателей. Для каждого механизма перемещения предусмотрена возможность включения алгоритма установки на

нуль-пункт, от которого производится отсчет положения элементов СИ.

ПЗС-приемник и механизмы СИ управляются одним компьютером на базе процессора Intel Pentium 4 с частотой 3.2 ГГц. Нами используется Varebone-система ХРС модели Shuttle SB81P с низким уровнем электромагнитного излучения. Управление камерой PhotonMAX-512В производится контроллером ST-133 по PCI-шине через волоконно-оптические приемо-передатчики AS-0230. Оперативная память увеличена до 2 Гб для обеспечения возможности быстрого накопле-

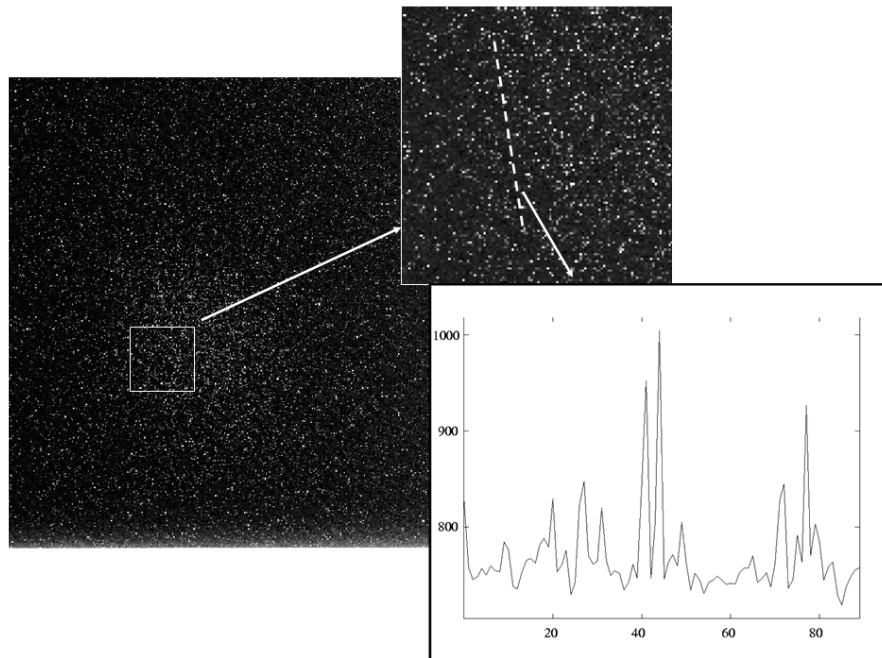


Рис. 11. Слева: отдельное спекл-изображение звезды ЛкНА 198, зарегистрированное камерой PhotonMAX-512В в режиме максимального усиления сигнала с матрицы. Справа сверху: увеличенный фрагмент с максимальным уровнем потока. Справа внизу: произвольное сечение, показывающее амплитуды отдельных фотонных событий.

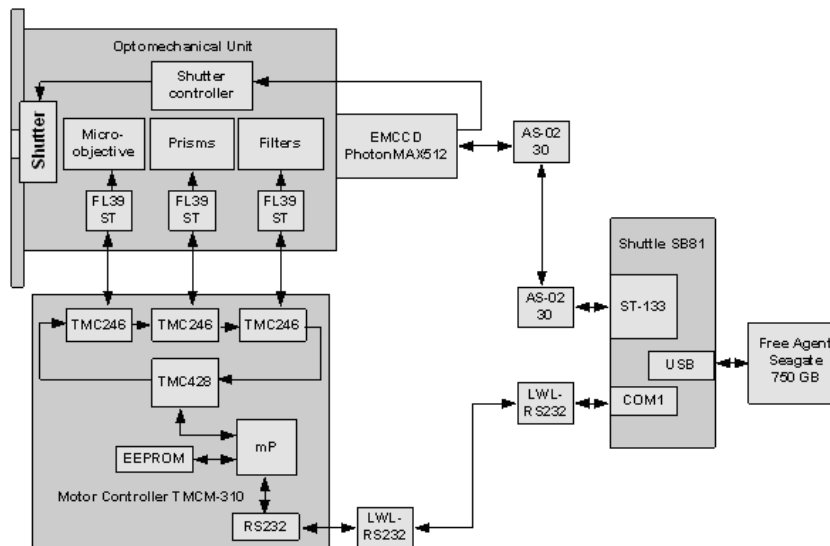


Рис. 12. Структурная схема управления СИ.

ния до 1940 спекл-изображений, которые затем записываются на жесткие диски компьютера в виде файлов формата SPE, который представляет собой последовательность двухбайтовых слов с заголовком в 4100 байт. В заголовке файла содержится информация о параметрах камеры, которые использовались во время накопления

кадров спекл-изображений. Накопление данных может осуществляться на внешние накопители большой емкости через USB-интерфейс.

При наблюдениях часто возникает необходимость контролировать ход накопления спектра мощности объекта в режиме реального времени. Наличие информации о двойственности (кратно-

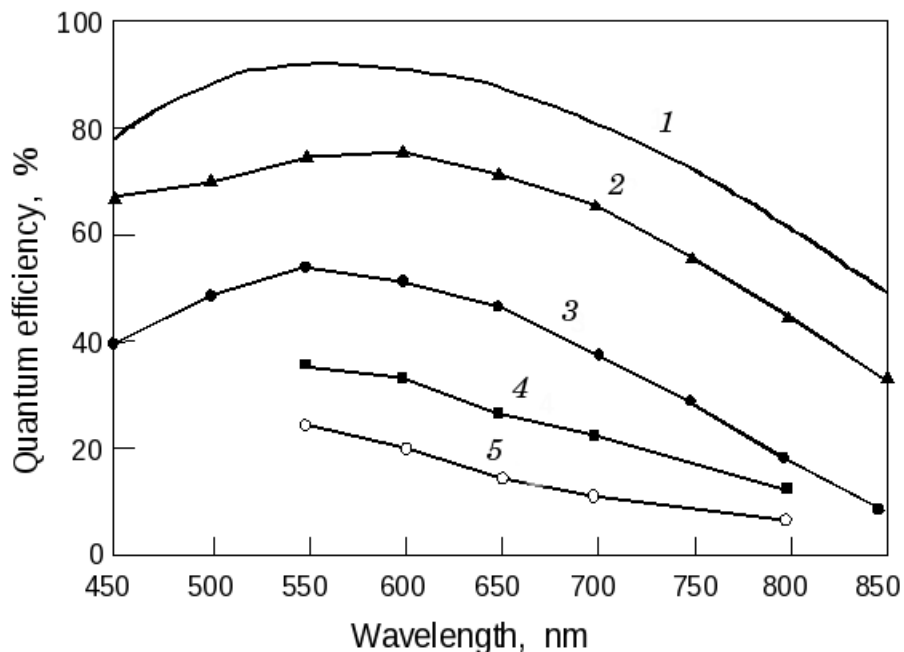


Рис. 13. Квантовая эффективность СИ с учетом потерь на оптических элементах: 1 — CCD97, 2 — CCD97 + входное окно камеры PhotonMAX-512B, 3 — CCD97 + входное окно камеры PhotonMAX-512B + призмы компенсации дисперсии, 4 — CCD97 + входное окно камеры PhotonMAX-512B + призмы компенсации дисперсии + фильтры, 5 — итоговая эффективность с учетом потерь на микрообъективах.

сти) объекта на начальном этапе позволяет оценить целесообразность дальнейшей регистрации. Для решения этой задачи в группе проводятся работы по внедрению в процесс наблюдений и обработки реконфигурируемых многопроцессорных вычислительных систем. В отличие от систем с жесткой архитектурой в реконфигурируемых системах параметры вычислений могут изменяться в процессе функционирования. В результате, у пользователя появляется возможность адаптировать архитектуру вычислительной системы под структуру решаемой задачи.

Для вычисления спектра мощности изображений во время экспозиции в НИИ Многопроцессорных вычислительных систем (г. Таганрог) был изготовлен комплекс на базе реконфигурируемого ускорителя персонального компьютера РУПК-25 производительностью 25 Гфлопс [9], реализующий параллельные алгоритмы для коррекции атмосферных искажений оптических изображений. Данный комплекс позволяет в режиме реального времени проводить редукцию спекл-интерферограмм и вычислять модуль пространственного спектра изображений наблюдаемого объекта. Помимо этого, комплекс допускает перепрограммирование, в том числе для восстановления фазы объекта.

5. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ

Квантовая эффективность (QE) СИ измерялась лабораторно в 9 длинах волн с применением дифракционного монохроматора МДР-41 и программируемого DSP-радиометра OL-730D, чувствительного в диапазоне от 200 до 1000 нм. На Рис. 13 показаны кривые эффективности системы с учетом потерь на всех оптических компонентах — от кривой CCD97 (кривая 1) до общей эффективности (кривая 5). Отметим, что сама матрица CCD97 имеет 20% эффективность и на длине волны 950 нм.

Мы сравнили возможности камеры PhotonMAX-512B по регистрации спекл-интерферограмм слабых звезд с детектором на основе трехкамерного электростатического электронно-оптического преобразователя AEG 1510 компании Siemens, сочлененного с быстродействующей ПЗС-камерой SensiCam 370LL (изготовлено PCO Computer Optics (Германия)), который использовался в наших наблюдениях до 2007 года. На Рис. 14 показаны отдельные спекл-интерферограммы двойной звезды DF Tau ($m_V=12^m$), полученные на БТА в октябре 2001 года и ноябре 2007. Наблюдения выполнялись в фильтре $\lambda/\Delta\lambda=800/100$ нм при качестве изображений $1''-1.5''$. В наблюдениях 2001 года масштаб $0.004''/\text{элемент}$ в фокусе телескопа обеспечивался

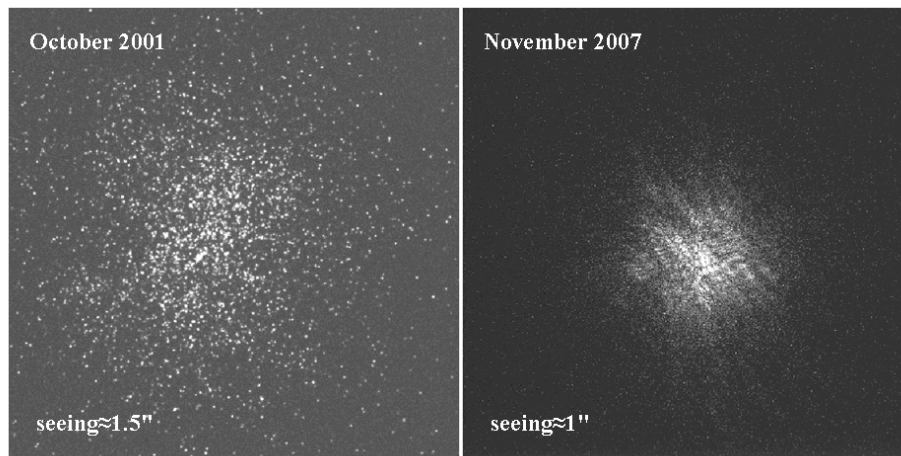


Рис. 14. Спекл-интерферограммы двойной звезды DF Тау: слева — изображение, полученное детектором ЭОП+ПЗС, справа — изображение с EMCCD.

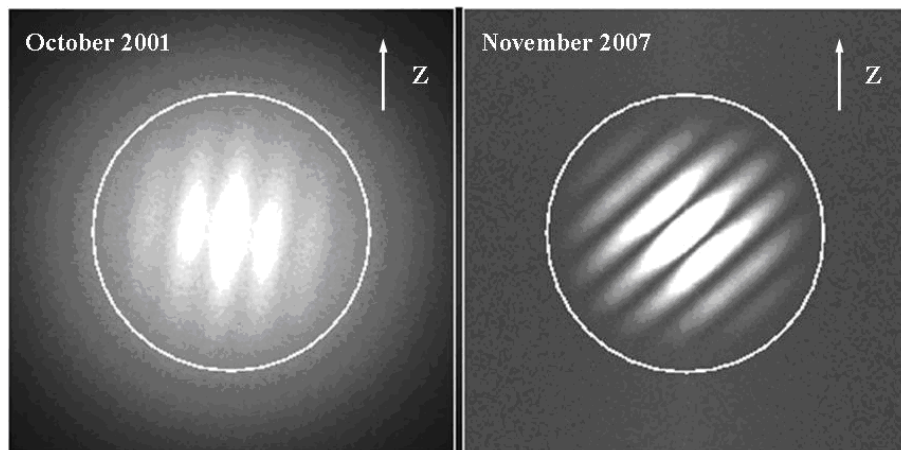


Рис. 15. Спектры мощности звезды DF Тау: слева — накопление по 2000 спекл-интерферограммам, полученным системой ЭОП + ПЗС, справа — аналогичное накопление при наблюдениях с EMCCD. Стрелкой отмечено направление на зенит.

микрообъективом с 32-кратным увеличением. В 2007 году масштаб изображения составлял $0.0087''/\text{элемент}$, для чего использовался микрообъектив с 16-кратным увеличением. Видно, что на левом снимке, полученном при помощи камеры с ЭОП, изображение представляет собой облако фотонов. При такой регистрации фотонный шум сильно затрудняет процедуру восстановления изображения двойной звезды. Для получения изображения понадобится обработать до 10 тысяч отдельных спекл-интерферограмм. На снимке с камерой EMCCD справа ясно прослеживается спекл-структура двойной звезды, а изображение объекта может быть восстановлено по нескольким десяткам кадров.

Для восстановления изображений звезд путем вычисления среднего по ансамблю спектра мощно-

сти серии мгновенных изображений нами используется метод Лабейри [1]. В случае наблюдения двойных и кратных звезд применяются алгоритмы, описанные в работах [6, 10]. На Рис. 15 представлены спектры мощности звезды DF Тау, усредненные по 2000 мгновенных изображений, некоторые из которых показаны на Рис. 14. Спектры мощности вычислены для серий спекл-изображений, полученных с использованием камеры ПЗС+ЭОП (слева) и нового приемника EMCCD (справа). Кружком отмечена граничная частота телескопа в рабочем фильтре. Период полос соответствует угловому расстоянию между компонентами двойной звезды (около $0.1''$), ориентация полос определяет их позиционный угол, контраст полос связан с разницей блеска между звездами системы.

Падение интенсивности с увеличением про-

странственной частоты на левом рисунке обусловлено наличием в спектре дополнительного фотонного шума, что приводит к частотно-зависимому смещению контраста полос. Исправление этого смещения представляет собой отдельную сложную задачу, а для слабых источников является препятствием для дифференциальной фотометрии компонентов. В спектрах мощности, накопленных с использованием ЕМССД, влияние фотонного шума сводится к общему изменению уровня подложки, которое несложно определить. Для восстановленного спектра мощности DF Tau, полученного в 2007 году с новой системой, характерен более высокий контраст полос, которые прослеживаются вплоть до граничной частоты, определяемой дифракцией на апертуре телескопа.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение выделим основные преимущества новой системы на основе ЕМССД в сравнении со спекл-интерферометром БТА предыдущего поколения, использовавшим ЭОП в оптическом сопряжении с ПЗС-камерой:

- сокращение общего времени экспозиции объекта за счет 4-кратного преимущества ЕМССД в быстродействии;
- повышение проникающей способности наблюдений до 15 величины вследствие 10-кратного преимущества в квантовой эффективности ЕМССД над фотокатодом ЭОП;
- увеличение точности восстановления изображений благодаря отсутствию фотонного смещения, которое является доминирующей проблемой при использовании ЭОП;
- увеличение максимально достижимой при наблюдениях двойных звезд разности блеска до 5 величин за счет широкого динамического диапазона регистрации и высокого отношения сигнал-шум в восстанавливаемом изображении;
- геометрическая стабильность детектора на основе ЕМССД и отсутствие дисторсий, характерных для ЭОП;
- увеличение рабочего поля спекл-интерфе-

рометра до 4'' за счет возможности использования меньшего оптического увеличения при работе с малым элементом ЕМССД (16 мкм).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность профессору Боннского института радиоастрономии Г. Вайгелту за помощь в приобретении отдельных оптических компонентов спекл-интерферометра, ведущему Лабораторией перспективных разработок Специальной астрофизической обсерватории С. В. Маркелову и ведущему инженеру этой же лаборатории В. А. Мурзину за полезные обсуждения и помощь в калибровочных измерениях, а также инженерам-программистам Отдела информатики Е. И. Кайсиной и С. Л. Комаринскому за наладку программного обеспечения. Работа была поддержана программами Президиума Российской академии наук "Происхождение, строение и эволюция объектов Вселенной" и Отделения физических наук Российской академии наук "Протяженные объекты во Вселенной". При изготовлении системы частично использовались средства, выделенные по гранту РФФИ 07-02-01489-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Labeyrie, *Astronom. and Astrophys.* **6**, 85 (1970).
2. A. W. Lohmann, G. Weigelt, and B. Winitzer, *Applied Optics* **22**, 4028 (1983).
3. D. Bonneau and A. Labeyrie, *Astrophys. J.* **181**, L1 (1973).
4. A. Labeyrie, L. Koechlin, D. Bonneau, et al., *Astrophys. J.* **218**, L75 (1977).
5. A. Blazit, in *ESA Colloquium on Kilometric Optical Arrays in Space (Saint Vallier de Thiey, France, 1985)*, p. 155.
6. I. I. Balega, Yu. Yu. Balega, K.-H. Hofmann, et al., *Astronom. and Astrophys.* **385**, 87 (2002).
7. P. L. Fried, *Journal of the Optical Society of America*, **55**, 1427 (1965).
8. J. C. Owens, *Applied Optics* **6**, 51 (1967).
9. И. А. Каляев, И. И. Левин, Е. А. Семерников и др., *Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры* (Издательство ЮНЦ РАН, Ростов-на-Дону, 2008).
10. A. F. Maximov, Yu. Yu. Balega, U. Beckmann, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **56**, 102 (2003).

THE EMCCD-BASED SPECKLE INTERFEROMETER OF THE 6-M BTA TELESCOPE: DESCRIPTION AND FIRST RESULTS

A.F. Maksimov, Yu.Yu. Balega, V.V. Dyachenko, E.V. Malogolovets, D.A. Rastegaev, A.A. Semernikov

The description is given for the speckle interferometer of the BTA telescope of the SAO RAS based on a new detector with an electron multiplication CCD. The main components of the instrument are micro objectives, interference filters and atmospheric dispersion correction prisms. The PhotonMAX-512B CCD camera using a back-illuminated CCD97 allows up to 20 speckle images (with 512×512 px resolution) per second storage on the hard drive. Due to high quantum efficiency (93% in the maximum at 550 nm), and high transmission of its optical elements, the new camera can be used for diffraction-limited ($0.02''$) image reconstruction of 15^m stars under good seeing conditions. The main advantages of the new system over the previous generation BTA speckle interferometer are examined.

Key words: *methods of astronomical observations, equipment and instruments*