

ТЕЛЕВИЗИОННЫЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТР С ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РЕАЛЬНОМ РЕЖИМЕ ВРЕМЕНИ

Ю. Ю. Балега, Н. Н. Сомов, А. Ф. Фоменко

Применение спекл-интерферометрии в астрофизических исследованиях дало ряд важных результатов по элементам орбит тесных звездных систем, угловым размерам нескольких звезд-гигантов и диаметрам околосозвездных оболочек в разных областях спектра. В работе описывается спекл-интерферометр с цифровой обработкой изображений, предназначенный для использования на 6-метровом телескопе АН СССР. Приемником излучения служит телевизионная камера, работающая в режиме счета фотонов. Быстродействующий процессор, в который поступают координаты центров фотонных вспышек, определяет 2-мерную функцию автокорреляции для каждого отдельного кадра и засылает результат в память цифровой системы накопления. Приводятся некоторые результаты телескопных испытаний.

The use of speckle interferometry in astrophysical investigations has given a number of important results about the orbit elements of close stellar systems, angular dimensions of several giants and diameters of circumstellar envelopes in different regions of the spectrum. A speckle interferometer with digital image processing intended for the use on the 6-meter telescope of the USSR AS is described in the paper. Photon counting television camera serves as a receiver. A fast processor where the coordinates of the centres of photon events are introduced, determines the 2-dimensional autocorrelation function for each individual frame and sends the results into memory of digital accumulation system. Some telescope test results are presented.

Спекл-интерферометрия — предложенный А. Лабейри [1] метод достижения предельной разрешающей способности в крупных телескопах на основе анализа мгновенных снимков астрономических объектов. Для получения дифракционного разрешения им было использовано сложение пространственных спектров мощности изображений вместо самих изображений. Это позволяет сохранить ту высокочастотную пространственную информацию, которая теряется в обычных условиях регистрации. Процедура спекл-интерферометрических наблюдений заключается в фотографировании с короткими экспозициями большой серии увеличенных изображений в узкой спектральной полосе. Затем каждый зарегистрированный кадр подвергается оптическому преобразованию Фурье, а результат усредняется на отдельной пластинке по многим кадрам. Спекл-интерферометрия дает только автокорреляционную функцию объекта, что ограничивает круг наблюдательных задач простыми астрономическими источниками малых угловых размеров, имеющими центральную симметрию.

Альтернативой фотографической регистрации и оптической обработки является непосредственный автокорреляционный анализ мгновенных изображений с применением телевизионных приемников. Несмотря на ограниченное число ячеек телевизионного кадра и незначительный динамический диапазон при работе в аналоговом режиме, телевизионные системы обеспечивают важное преимущество — возможность стыковки с цифровыми средствами вычислений и накопления. Помимо этого, в форме счетчика фотонов телевизионная камера дает большой выигрыш в чувствительности и фотометрической точности.

Учитывая растущий интерес астрономов к наблюдениям с высоким угловым разрешением, особенно в области внегалактических исследований, в Специальной астрофизической обсерватории АН СССР на базе панорамной системы накопления и обработки телевизионных изображений [2] создан цифровой спекл-интерферометр с автокорреляционным анализом информации в режиме реального времени.

Реализация вычислений автокорреляции. Автокорреляционная функция изображения определяется как

$$C(x, y) = I(x, y) * I(x, y) = \{O(x, y) * O(x, y)\} \otimes \{P(x, y) * P(x, y)\}, \quad (1)$$

где $I(x, y)$ — мгновенное распределение интенсивности в изображении; $O(x, y)$ — распределение интенсивности в самом объекте; $P(x, y)$ — функция рассеяния точки для конкретного состояния атмосферы в момент регистрации; знак * означает пространственную автокорреляцию, а \otimes — свертку.

Корреляционный профиль для точечного объекта представляет собой узкий центральный пик, связанный со спекл-структурой изображений, расположенный на относительно широком пьедестале. В случае объекта с неточечной геометрией средняя автокорреляционная функция является сверткой с автокорреляцией самого объекта, поэтому последняя может быть легко выделена. В конкретном случае двойной звезды в профиле корреляции помимо центрального пика будет наблюдаться пара симметрично расположенных пиков меньшей интенсивности. Это вызвано тем, что для двойного объекта пятна — результат интерференции света от когерентных участков волнового фронта — имеют тенденцию к попарному расположению, так как в целом пятнистая картинка является наложением двух почти идентичных, но слегка смещенных одно относительно другого спекл-изображений.

Анализ просто реализуется с помощью вычислительных средств. Процедура обработки кадра состоит в определении координат центров пятен и вычислении гистограммы всех возможных векторов между ними. Для пары звезд слабого блеска картинка будет отличаться за счет флуктуаций количества фотонов в изображениях, вызванных двумя причинами: случайным распределением интенсивности и пуассоновской природой регистрации фотонов. Коэффициент корреляции, который является сигналом в спекл-интерферометрическом методе, при этом зависит от среднего числа зарегистрированных квантов в одном пятне. Отношение сигнал/шум метода для очень слабых световых потоков определяется выражением

$$q = \frac{\langle n \rangle}{2} \sqrt{\frac{N}{\langle n_s \rangle}}, \quad \frac{\langle n \rangle}{2} \ll \langle n \rangle, \quad (2)$$

где $\langle n \rangle$ — среднее число зарегистрированных в одном кадре фотонов; N — полное число используемых кадров, в то время как $\langle n_s \rangle$ — среднее число пятен в спекл-изображении (порядка 10^3 для телескопа диаметром 6 м). Если учесть, что даже для ярких квазаров с имеющимися светоприемниками в типичных условиях регистрации наблюдается не более нескольких фотонов в кадре, то из (2) становится очевидной необходимость обработки 10^5 — 10^6 кадров для получения удовлетворяющего значения Q . Отсюда вытекают требования к быстрдействию системы обработки: не менее 25—50 Гц, если мы хотим за 2 ч наблюдений получить информацию об объекте 14—15 звездной величины.

На рис. 1 приводится общая схема системы автокорреляционного анализа мгновенных изображений, предназначенной для оснащения 6-метрового телескопа. Приемником служит телевизионная камера, работающая в режиме регистрации отдельных фотонов и состоящая из 3-камерного электронно-оптического преобразователя (ЭОП) УМ-92 с магнитной фокусировкой, оптически состыкованного с высокочувствительной телевизи-

онной трубкой. Частота сканирования мишени трубки равна 60 Гц, поэтому время записи кадра составляет 0.017 с, что близко к характерным экспозициям в классическом спекл-интерферометрическом методе. Изображение представляет собой отдельные сцинтилляции на темном фоне. Так как регистрируемые фотонные события имеют на экране ЭОП размеры, превышающие элемент разрешения телевизионного кадра, то первым важным этапом обработки является определение центров сцинтилляций в специальном устройстве [3]. Центровка вспышек позволяет сохранить нужную разрешающую способность и предохраняет цифровую память от загрузки

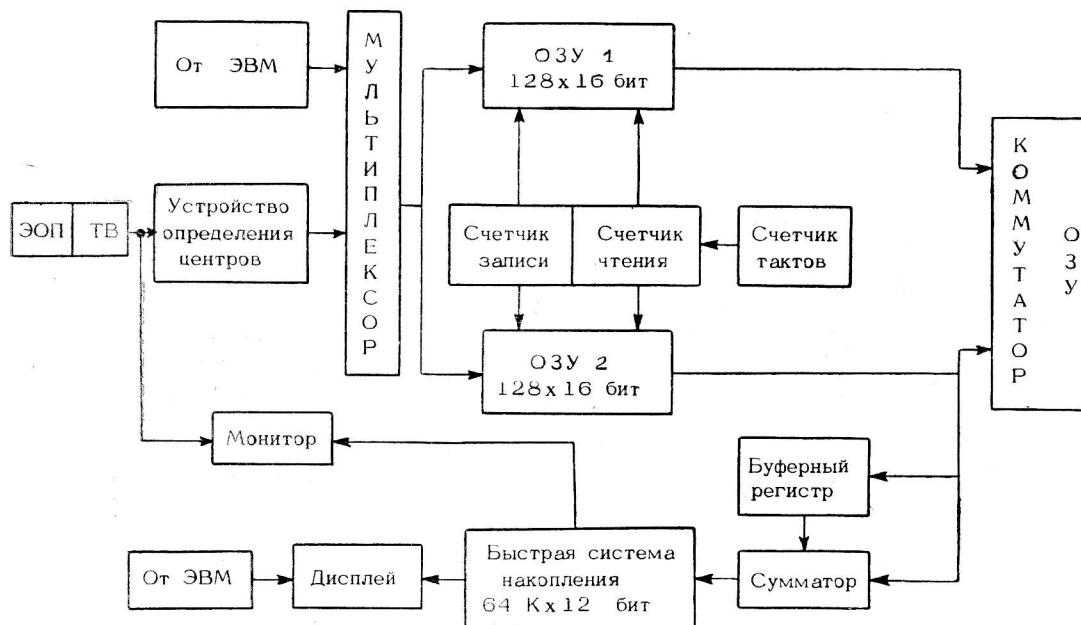


Рис. 1. Блок-схема цифровой системы автокорреляционного анализа телевизионных спекл-изображений.

избыточной информацией. Дальнейший ход обработки понятен из схемы. Координаты центров фотонных событий, зарегистрированных в течение одного кадра, через мультиплексор поступают в одно из оперативных запоминающих устройств (ОЗУ 1); во время записи обрабатывается содержимое второго устройства (ОЗУ 2). По приходу кадрового синхроимпульса режим работы ОЗУ меняется: теперь запись ведется в то устройство, содержимое которого обрабатывалось в предыдущем кадре.

Для быстрых вычислений функций использовался алгоритм, предложенный А. Блази и др. [4]. Функция вычисляется вычитанием из координат одного фотона в кадре координат всех остальных с последующим перебором всех фотонов и наращиванием содержимого памяти на единицы по тем адресам, которые даются результатами вычитаний:

$$c(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (l_i - l_{j-y}, f_i - f_{j-x}), \quad (3)$$

где (l_i, f_i) и (l_j, f_j) — координаты i -го и j -го фотонов соответственно. Средняя автокорреляция определяется накоплением результатов по многим кадрам:

$$C(x, y) = \sum_{k=1}^N c_k(x, y), \quad (4)$$

где N — общее число кадров.

Операция вычитания координат выполняется с помощью сумматора и буферного регистра. Объем интеграционной памяти, где накапливается результат, равен 64×12 -разрядных слов. Это значит, что при использовании формата кадра 256×256 элементов в каждую из ячеек памяти может быть записано до 4096 единичных событий.

Поскольку емкость ОЗУ составляет 128 16-разрядных слов, то система может обрабатывать до 128 фотонов в кадре; при больших потоках часть событий не анализируется, а информация теряется. Однако на практике это ограничение не является очень весомым, так как в спекл-интерферометрии мы преимущественно имеем дело со слабыми потоками. И даже аналоговые изображения, получаемые для ярких звезд при пониженном напряжении на ЭОП, могут быть по-прежнему скоррелированы после дискриминации уровня сигнала до такой степени, что устройство определения центров фотонных вспышек выделяет центры аналоговых пятен в спекл-изображении.

Работа системы управляется и контролируется мини-ЭВМ «Электроника-100И», причем процесс накопления автокорреляции в памяти визуализируется на телевизионном экране.

Результаты испытаний.

Телескопные испытания спекл-интерферометра выполнялись в течение 1979 г. в несмитовском фокусе 60-см телескопа обсерватории. Использовался оптический тракт, идентичный применяющимся другими исследователями установкам. Его основные узлы — микрообъектив, сменные интерференционные фильтры и устройство компенсации атмосферной дисперсии — смонтированы на общей оптической скамье, к которой также крепится приемная камера. Выбор увеличения определяется разрешающей способностью приемника и диаметром диска дифракции для данного телескопа. Размер ячейки телевизионного кадра равен 40 мкм. В то же время для обеспечения высокого разрешения дифракционный диск диаметром $0.2''$ должен занимать несколько ячеек кадра. Для этого с помощью стандартного ахроматического микрообъектива масштаб изображения был выбран равным $0.7/мм$, что соответствует эквивалентному фокусному расстоянию 290 м.

Призма прямого зрения (Рислея) представляет собой наиболее сложный элемент схемы. Спекл-интерферометрия использует очень большие увеличения, поэтому влияние хроматизма земной атмосферы заметно даже на небольших зенитных расстояниях. Оно проявляется в вытягивании пятен в спекл-изображении по направлению к зениту, и обычно только незначительная центральная область сохраняет пятна правильной круглой формы. Хроматическая аберрация, вносимая атмосферой, может быть скомпенсирована установкой призмы, дающей обратную дисперсию; при этом должна учитываться зависимость атмосферного влияния от зенитного расстояния объекта. Изготовленная нами призма прямого зрения состоит из двух пар клиньев комбинации крон-флинт, находящихся в оптическом контакте через иммерсию. Разность отклонений красного и синего пучков может задаваться от 0 до 2 мин дуги вращения клиньев вокруг

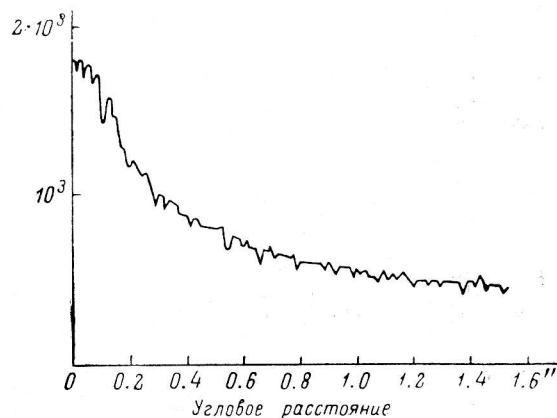


Рис. 2. Сечение автокорреляции «точечной» звезды δ Воо.

По осям отложены угловое расстояние и количество отсчетов в ячейках памяти.

центральной оси, что позволяет эффективно исправлять атмосферную дисперсию на зенитных расстояниях до 70° .

Технические возможности 60-см телескопа не позволили нам провести спекл-интерферометрические наблюдения достаточно слабых объек-

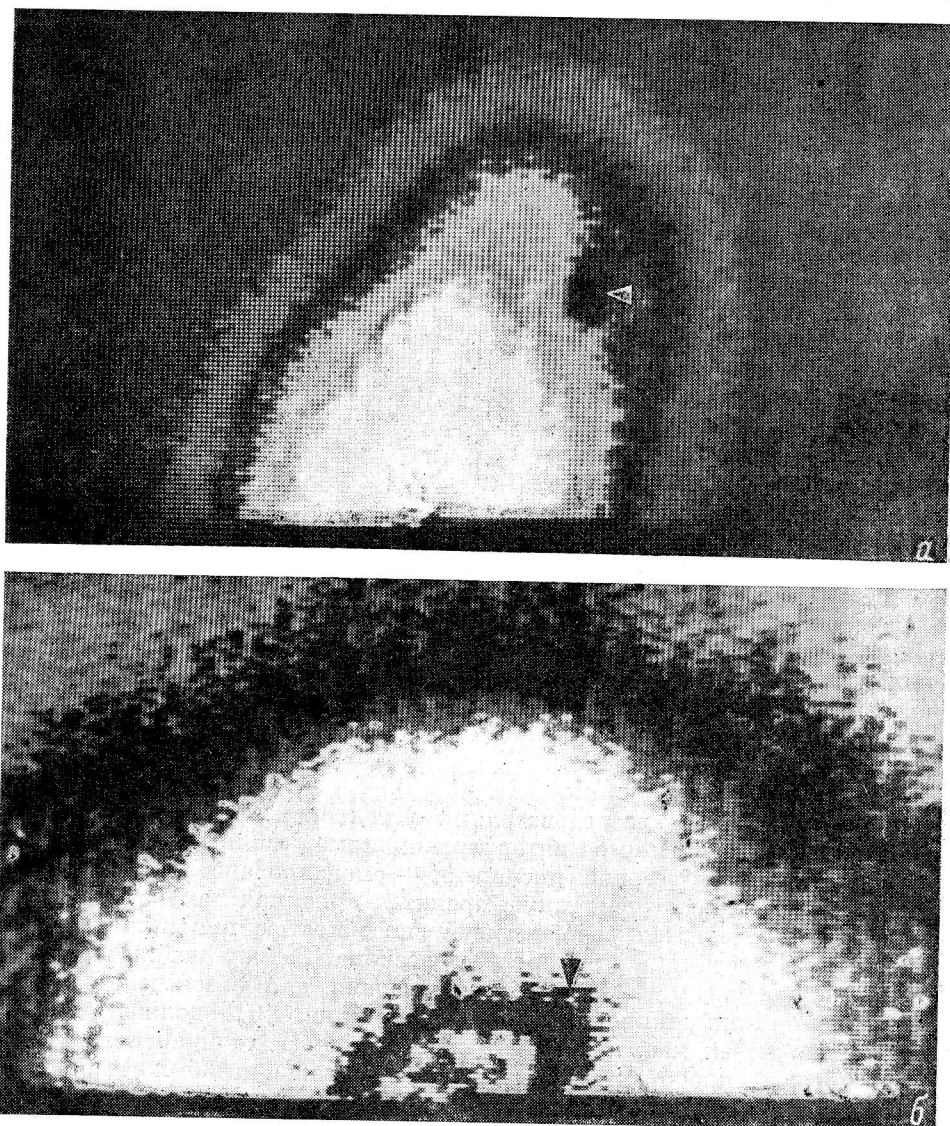


Рис. 3.

a — 2-мерная автокорреляционная функция для двойной системы η Ori, по которой определены видимые положения компонент: $\rho = 1''.54 \pm 0''.08$ и $\theta = 54^\circ \pm 2^\circ$; *b* — автокорреляция для θ Vir: $\rho = 0.50'' \pm \pm 0''.12$ и $\theta = 21^\circ \pm 3^\circ$. Поскольку автокорреляционная функция обладает центральной симметрией, на экране отображается только ее верхняя полуплоскость. Положения вторичных пиков, указывающих на существование компаньонов, отмечены стрелками.

тов. Для ярких звезд процесс накопления автокорреляции занимает несколько минут. Обычно автокорреляционная функция неразрешаемого телескопом объекта имеет центральный максимум (так называемый спекл-пик), расположенный над плавно убывающим основанием (рис. 2). Ход основания определяется в первую очередь оптической нестабильностью атмосферы. Двойственность наблюдаемого объекта сопровождается побочным максимумом в автокорреляции. Расстояние и ориентация второго

пика по отношению к центральному позволяют непосредственно установить видимые параметры двойной звезды. В качестве примеров на рис. 3 демонстрируются автокорреляционные функции для η Ori и θ Vir. Первая из них — хорошо изученная двойная с компонентами 4-й и 5-й звездной величины. Вторичный пик в автокорреляции находится на расстоянии 55 элементов телевизионного кадра от центрального максимума, что соответствует удаленности $1''.54 \pm 0''.08$. Результат получен при атмосферном качестве изображений $5''$. Более тесной парой является θ Vir — объект с блеском $4^m 4$, для которого расстояние между компонентами было найдено равным $0''.50 \pm 0''.12$; большая погрешность результата вызвана значительным зенитным расстоянием звезды во время наблюдений ($\sim 55^\circ$). Все объекты наблюдались нами в области 525 ± 6 нм.

Из-за скромных размеров используемого телескопа созданная система не была применена для измерений угловых диаметров звезд. Известно, что спекл-пик в автокорреляции разрешаемого звездного диска или околосредной материи получается более широким и пологим, чем для точечных источников. Задача анализа заключается в вычитании из общей автокорреляционной функции компоненты, связанной с атмосферной турбулентностью, и в последующем сравнении остающегося пика с серией кривых, представляющих собой свертку дифракционного диска Эйри с автокорреляцией однородного диска. Такой подход успешно использовался А. Блази и др. [5] для измерений звездных диаметров, а в несколько измененной форме — С. Арнольдом и др. [6] при наблюдениях видимых размеров Плутона.

2-мерная техника с цифровой обработкой видеосигнала позволяет существенно расширить круг интерферометрических исследований в направлении объектов слабого блеска. Как показал Дж. Дэйнти, интерферометрическая информация может быть получена для очень малых потоков — 2 и даже меньше фотонов на кадр. Это подтверждается и результатами практики наблюдений [5, 6]. По нашим оценкам, применение метода на телескопе БТА с использованием существующего светоприемного оборудования позволит изучать объекты до 14—15 звездной величины с динамическим диапазоном 4—5 величин. Дальнейшее продвижение в сторону слабых объектов полностью определяется прогрессом в создании новых светоприемников.

Список литературы

1. Labeyrie A. Attainment of diffract limited resolution in large telescope by Fourier analysing speckle patterns in star images. — *Astron. and Astrophys.* 1970, 6, p. 85.
2. Балегга Ю. Ю., Касперович А. Н., Попов Ю. А., Сомов Н. Н., Фоменко А. Ф. Цифровая система накопления и обработки телевизионных изображений для астрофизических исследований. — *Автометрия* (в печати).
3. Попов Ю. А. Об одном способе оперативного выделения центров фотонных вспышек при считывании изображения с экрана ЭОП. — *Автометрия*, 1978, № 6, с. 19—23.
4. Blazit A., Koechlin L., Oneto J. L. On-line digital correlation of photon counting TV images for stellar interferometry. — *Image Processing Techniques in Astronomy*. Dordrecht-Holland, 1975, p. 79—84.
5. Blazit A., Vonneau D., Koechlin L., Labeyrie A. The digital speckle interferometer: preliminary results on 59 stars and 3C 273. — *Astrophys. J.*, 1977, 214, p. L79—L84.
6. Arnold S. J., Boksenberg A., Sargent W. L. W. Measurement of diameter of Pluto by speckle interferometry. — *Astrophys. J.*, 1979, 234, p. L159—L163.