

Санкт-Петербургский государственный университет
Математико-механический факультет
Научно-исследовательский астрономический институт
им. В.В. Соболева

Е.Н. Копацкая, В.М.Ларионов

**Фотометрические и поляриметрические
наблюдения с ПЗС-камерой
на телескопах LX200 и АЗТ-8**

(Учебно-методическое пособие)

Санкт-Петербург

2007

Введение.

Фотометрия и поляриметрия являются важнейшими методами астрономических исследований. Многоцветная фотометрия позволяет узнать распределение энергии в спектрах астрономических объектов и получить представление об их физических характеристиках – температуре, светимости, массе. Исследование различных типов фотометрической переменности звезд и галактик необходимо для понимания происходящих в них процессов. Поляриметрические наблюдения дают информацию о пылевой составляющей материи – распределении пыли, размерах пылевых частиц, распределении и направлении магнитных полей, геометрии околос звездных оболочек. В последние два десятилетия благодаря новым современным приемникам (ПЗС) возможности фотометрии сильно увеличились. Даже на небольших телескопах можно достичь предельной величины 20^m и более. В Астрономическом институте СПбГУ проводятся фотометрические и поляриметрические наблюдения звезд и внегалактических объектов на двух телескопах – LX200 (D=40 см), установленном в Петергофском Учебно-Научном комплексе и АЗТ-8 (D=70 см) – телескопе Крымской Астрофизической Обсерватории. Каждый телескоп оснащен фотометром-поляриметром на основе ПЗС камеры ST-7ХМЕ.

В данном пособии будут изложены основные характеристики приемников ПЗС, порядок работы с камерой ST-7ХМЕ на телескопах LX200 и АЗТ-8, а также методика обработки наблюдений.

Предполагается, что с теоретическими основами фотометрии и поляриметрии студенты знакомы из курса общей астрофизики.

Приемники ПЗС. Общие понятия.

Первые ССД (charge couple device) или в русском переводе ПЗС (приборы с зарядовой связью) появились в конце 60-х годов, а в астрономии такой прибор был впервые применен в 1975 году для получения изображения планеты Уран в ближнем инфракрасном свете. ПЗС – интегральные твердотельные полупроводниковые приемники излучения, отличающиеся тем, что электрический сигнал представлен в них не током или напряжением, а зарядом. Зарядовые пакеты создаются и хранятся в потенциальных ямах, образуемых в полупроводнике под действием внешнего электростатического поля. В основе работы ПЗС лежит явление внутреннего фотоэффекта. Сам прибор – довольно сложная микросхема с линейкой или двумерной матрицей, состоящей из прямоугольных светочувствительных элементов, называемых пикселями. Такая матрица способна накапливать, хранить и передавать для считывания фотоэлектроны, рожденные под действием света во время экспозиции. Каждый пиксел заполняется электронами пропорционально количеству попавше-

го на него света, то есть ПЗС является линейным приемником для большого диапазона световых потоков.

ПЗС-матрицы, применяемые в астрономии, имеют высокую интегральную чувствительность, а спектральный диапазон чувствительности простирается от голубой (~ 0.4 микрон) до ближней инфракрасной (0.9 микрон) области. Чувствительность ПЗС-матрицы зависит от размеров площади светочувствительной области, т.е. от размера пикселей, и от квантовой эффективности. Для характеристики ПЗС используется именно квантовая эффективность, которая в отличие от квантового выхода отображает не полное количество электронов, высвобождаемое при поглощении одного фотона, а то их количество, которое попало в потенциальную яму. Квантовая эффективность зависит от длины волны и в отдельных участках спектра может превосходить 80%. В среднем по всей спектральной области чувствительности квантовая эффективность ПЗС-матриц составляет 50-60%, что почти на порядок выше, чем у лучших фотоэлектрических приемников. В дорогих ПЗС профессионального уровня для повышения чувствительности используется метод обратной засветки, когда световой сигнал падает со стороны сошлифованной кремниевой подложки. Это позволяет существенно увеличить квантовый выход, но в результате появляется паразитный сигнал, вызванный интерференцией света в слое кремния. Этот эффект - "fringes" ("рябь") сильнее всего проявляется в длинноволновых фильтрах, R и I. В последние годы разработана методика, позволяющая добиться высокого квантового выхода более дешевым способом и без побочных эффектов – за счет использования матрицы микролинз непосредственно перед ПЗС и нанесения многослойного противоотражательного покрытия. Зависимость квантовой эффективности от длины волны у ПЗС ST-7ХМЕ приведена на рис. 1.

Важной характеристикой является размер пикселей. В настоящее время выпускаются ПЗС матрицы с размерами пикселей от 7x7 мкм до 27x27 мкм. Чем больше размеры пиксела, тем больше электронов он может накопить до насыщения, и тем больший диапазон яркостей (динамический диапазон ПЗС) можно получить. Пиксели малых размеров обеспечивают высокую разрешающую способность, при этом чувствительность существенно понижается. Поскольку основным фактором, лимитирующим разрешение, является качество неба, во многих ПЗС камерах предусмотрена возможность менять разрешение матрицы: 1 пиксел (HIGH), 2x2 (MEDIUM) и 3x3 пиксела (LOW). Это удобно и с точки зрения фотометрии, поскольку позволяет добиться разумного компромисса между стремлением к высокому разрешению и большому отношению сигнал/шум.

В процессе считывания накопленных в пикселах фотоэлектронов образуется последовательность электрических сигналов, которые преобразуются в цифровую форму и записываются в компьютер. Положение

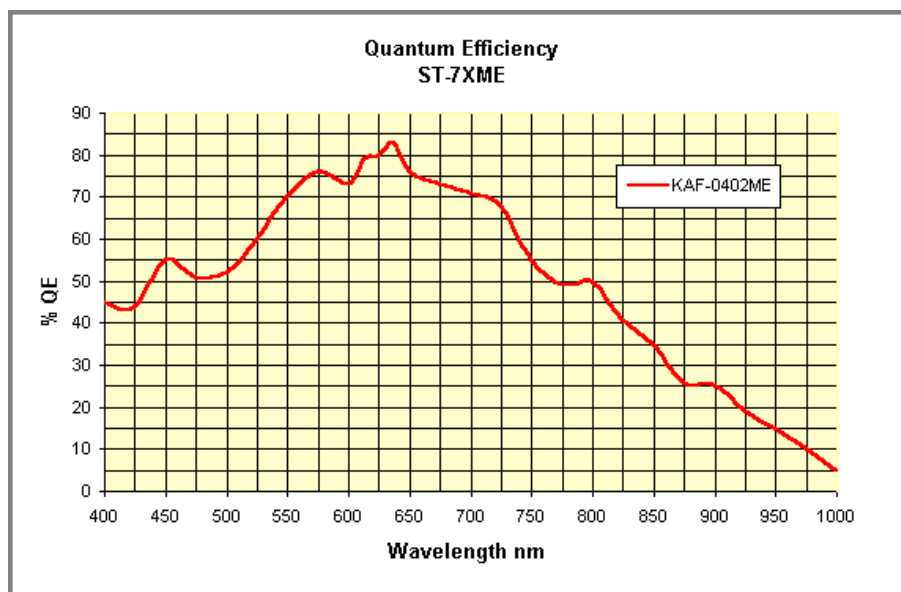


Рис. 1: Кривая спектральной чувствительности камеры ST-7XME с кристаллом KAF-0404ME.

пиксела в матрице (номер строки и номер столбца) остается фиксированным. В результате на дисплее компьютера мы видим подобное фотографическому изображению регистрируемой области неба – ПЗС матрица является панорамным приемником. Поле зрения, получаемое с ПЗС матрицей, сравнительно невелико. Типичные матрицы имеют размеры от 512x512 до 2048x2048 пикселей. В зависимости от размера матрицы и от фокусного расстояния телескопа поле составляет от нескольких угловых минут до полуградуса. В таком поле всегда можно найти звезды сравнения для фотометрии. Таким образом, ПЗС матрица совмещает в себе преимущества фотографии (панорамность) и фотоэлектрической фотометрии (линейность).

Рассмотрим теперь недостатки, или, скорее, ограничения, присущие ПЗС-приемникам. Некоторые из них связаны с проблемами технологии изготовления матриц и астрономы перед ними бессильны. С другими недостатками можно бороться, улучшая методику наблюдений и их обработки.

Предельная обнаружимая звездная величина при наблюдениях с ПЗС матрицей, как и для всех приемников, зависит от отношения сигнал/шум. При малых световых потоках важным параметром ПЗС-матрицы становится порог чувствительности, характеризующий минимальный световой поток, который может быть зарегистрирован. Главным фактором,

ограничивающим порог чувствительности, является темновой сигнал – электроны, производимые самой матрицей вследствие термоэлектронной эмиссии и попавшие в потенциальную яму при полном отсутствии светового потока. Величина темнового сигнала зависит от температуры матрицы и времени экспозиции. Эффективным способом уменьшить темновой сигнал является охлаждение матрицы – при уменьшении температуры на 9 градусов темновой сигнал уменьшается вдвое. Все современные ПЗС-матрицы, используемые в астрономии, снабжены либо миниатюрными холодильниками, позволяющими охлаждать матрицу до низких температур и поддерживающими температуру охлаждения с точностью до одной десятой градуса, либо же охлаждаются жидким азотом.

Темновой сигнал вносит в полезный сигнал искажение, особенно существенное для малых световых потоков. Кроме того, он накапливается в каждом пикселе с разной скоростью, и если его не компенсировать, это существенно увеличит шумы. Чтобы исключить темновой сигнал, в течение наблюдательной ночи получают темновые кадры **dark** - в тех же условиях, что и рабочие кадры, но при закрытом затворе. Далее кадры **dark**, предварительно масштабированные на время экспозиции рабочего кадра, вычитаются из рабочих.

Потери электронов происходят не только в процессе накопления заряда в потенциальной яме, но и в процессе передачи заряда во время считывания, и они могут быть значительными. В первых матрицах при коэффициенте передачи заряда от пиксела к пикселу 0.999 по пути к последнему пикселу терялось до 65% фотоэлектронов. В современных матрицах коэффициент передачи заряда от пиксела к пикселу составляет уже $0.9999 \div 0.99999$, т.е. потери составляют не более 5%.

Далее, несмотря на небольшие линейные размеры, невозможно сделать поверхность матрицы идеальной, пикселы могут отличаться друг от друга и по размерам, и по квантовой эффективности, и по коэффициенту передачи заряда, все это создает неравномерность чувствительности матрицы по полю. Однако если получить снимки равномерного серого поля, так называемого “плоского поля”, неравномерности яркости по поверхности рабочего кадра можно будет скорректировать при обработке. “Плоские поля” обычно снимают на закате или на рассвете, выбирая область неба без звезд. Можно использовать и равномерно освещенный экран. Поскольку параметры матрицы достаточно стабильны, “плоские поля” не обязательно снимать каждую ночь.

Отметим теперь основные типы шумов, влияющих на отношение сигнал/шум. Во-первых, это фотонный шум – шум светового потока. Во-вторых, шум темнового сигнала. Эти шумы подчиняются статистике Пуассона. Следующим по значимости источником шумов является выходное устройство, его шумы – шум, возникающий при передаче заряда от пиксела к пикселу, шум считывания и шум сброса, когда из детектора выводится ранее накопленный заряд.

Остановимся подробнее на шуме считывания. Когда заряд, накопленный в ПЗС, выводится из матрицы, преобразуется в напряжение и усиливается, в каждом пикселе появляется дополнительный шум. В процессе считывания создается некоторый нуль-пунктный уровень сигнала, называемый смещением (соответствующий англоязычный термин "bias"), который сохраняется даже при отсутствии светового потока и нулевой экспозиции. Для определения смещения каждую ночь получают несколько кадров с нулевой (точнее, предельно короткой) экспозицией и закрытым затвором **bias**, усредняют, используя медианную фильтрацию, и вычитают из всех полученных за ночь кадров, включая кадры **dark**.

Как уже говорилось, ПЗС матрица является линейным приемником – но в некоторых пределах. Типичная величина заряда, который можно хранить в пикселе и передавать, составляет $10^5 - 10^6$ электронов. Примерно такой заряд накопится за 1 секунду, если наблюдать звезду 7-й величины в полосе V на телескопе с диаметром зеркала 0.5 м. Если продолжать экспозицию, то возникнет переполнение пиксела. При этом часть заряда может переместиться в соседние пикселы. Этот эффект называется оптической пересветкой и проявляется в виде вертикального расплывания изображения. В настоящее время с эффектом оптической пересветки успешно борются, изменив конструкцию пиксела, что позволяет отправлять избыток заряда в сток, не нарушая засветку соседних пикселов (антиблуминг). (Впрочем, это позволяет лишь добиться "красивого" изображения, а диапазон линейности матрицы и ее пространственное разрешение при этом существенно уменьшается.) Однако самое главное, что при переполнении пикселов перестает соблюдаться прямая пропорциональность количества освещения и заряда, поэтому нужно следить, чтобы отсчеты и на объект, и на звезды сравнения не выходили из области линейности.

Для астрономических наблюдений используются ПЗС камеры, элементами которых, кроме высокочувствительной ПЗС матрицы, являются термоэлектрический холодильник с микроконтроллером, затвор, позволяющий получать экспозиции от 0.1 секунды, предусилитель и аналого-цифровой преобразователь для передачи полученных сигналов в компьютер. Вместе с блоком фильтров ПЗС камера образует астрофотометр, который размещается в фокусе телескопа. Камера снабжена блоком питания и соединяется с компьютером через порт USB. Более подробно с устройством и работой ПЗС приемников можно познакомиться в работах [1-5].

Наблюдения

Фотометрические наблюдения с ПЗС камерой ST-7ХМЕ.

Астрономический институт СПбГУ располагает двумя камерами ST-7ХМЕ. Камеры изготовлены американской фирмой SBIG (Santa Barbara Instrumental Group), специализирующейся на выпуске оборудования для астрономов. Общий вид камеры изображен на рис. 2.



Рис. 2: Камера ST-7ХМЕ с блоком фильтров CFW-10.

Прежде чем перейти к изложению методики наблюдений, приведем основные характеристики ПЗС матрицы, изготовленной фирмой Kodak и используемой в ST-7ХМЕ:

число пикселей	765 × 510	
размер пиксела	9 × 9	мкм
линейный размер	6.9 × 4.6	мм
темновой ток	1e-/pixel/sec при 0° С	
шумы считывания	15e ⁻	

Кривая спектральной чувствительности представлена на рис. 1. По сравнению с более ранними модификациями камеры ST-7 чувствительность ST-7ХМЕ существенно выше, особенно в голубой части спектра. Максимум чувствительности лежит в области линии H_α.

Каждая камера снабжена блоком широкополосных фильтров UVB системы Джонсона и RI Казинса, то есть стандартное оборудование позволяет выполнять пятицветные фотометрические наблюдения. Чтобы иметь возможность получать и поляриметрические наблюдения, в лаборатории наблюдательной астрофизики НИАИ к набору фильтров были добавлены анализаторы поляризованного излучения: две пластины Савара, ориентированные под углами 0° и 45° к экваториальной плоскости – для наблюдений двух параметров Стокса Q и U. Основным ограничителем точности этого очень простого поляриметра является то, что измерения параметров Стокса производятся с разными анализаторами, поэтому степень поляризации измеряется с точностью, составляющей $\simeq 0.5\%$. Фотометрические наблюдения будем называть наблюдениями в фотометрической моде, поляриметрические - наблюдениями в поляризационной моде. Процесс наблюдений с камерой ST-7ХМЕ в фотометрической моде практически идентичен для обоих телескопов. Различия в устройстве поляриметров и, соответственно, процессе наблюдений в поляризационной моде будут указаны для каждого телескопа отдельно, обязательно прочтите то, что касается вашего телескопа, прежде чем приступать к наблюдениям.

Объекты, включенные в программу наблюдений, должны быть записаны в файл **tabob.txt**, расположенный в директории C:\UTILS. Записывается название объекта и его экваториальные координаты на эпоху 2000 г. В дальнейшем при наблюдениях должно использоваться именно это название объекта. В той же директории UTILS находится программа **timespb.exe** для LX200 или **timeut.exe** для АЗТ-8. Эта программа вычисляет текущие координаты объекта, часовой угол и воздушную массу.

Для получения астрономических изображений используется программа CCDOPS (входящая в комплект поставки ST-7).

Порядок действий:

1. За полчаса до начала наблюдений включить блок питания камеры, компьютер, открыть программу CCDOPS и установить связь с камерой: CAMERA → SETUP. В появившемся окне (рис. 3) активировать охлаждение камеры, задав температуру на ~ 25 градусов ниже температуры под куполом. Индикатор температуры находится в правом нижнем углу окна CCDOPS. Там же фиксируется и текущий фильтр.
2. Создать директорию, куда будут записываться рабочие файлы: FILE: CREATE DIRECTORY: YYYYMMDD.
3. Навести телескоп на интересующий объект - подробности для каждого телескопа см. далее.

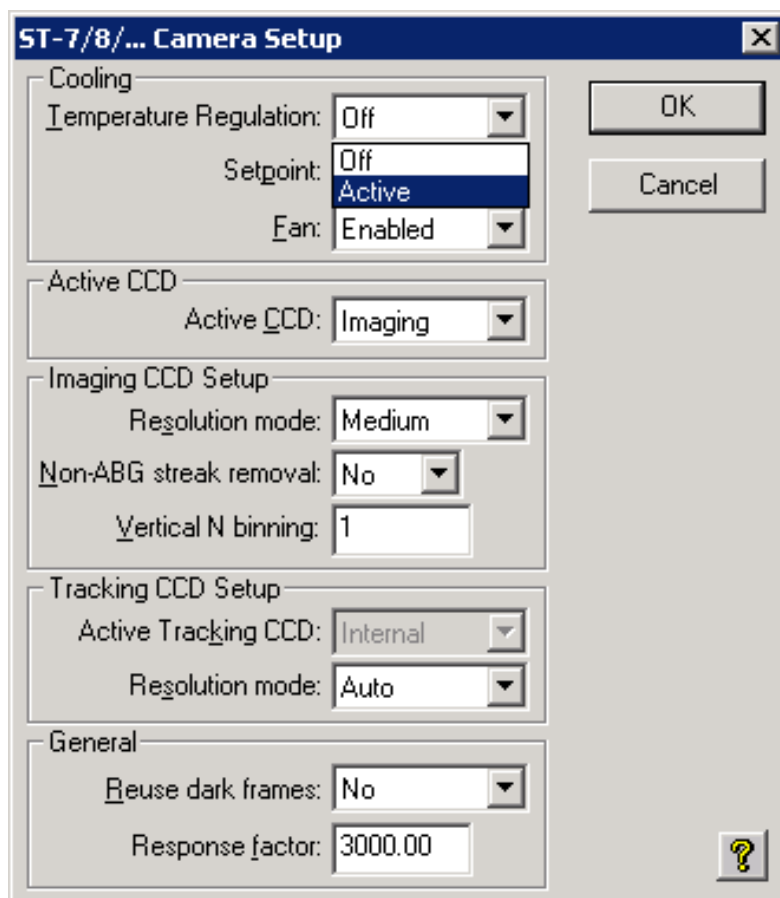


Рис. 3: Окно настройки параметров CCDOPS

4. Поставить нужный фильтр в FILTER. Фильтры меняются обязательно в порядке следования - UVRI. Например, если после фильтра I необходимо поставить фильтр V, то следует сначала поставить U, затем B, и далее V.¹
5. В CCDOPS открыть FOCUS. Задав время экспозиции и нажав ОК, будем получать кадры, следующие один за другим. В этом режиме делается фокусировка, а также более точно ставится в центр поля нужная область неба. Звезды для фокусировки не должны быть ни слишком яркими, ни слишком слабыми. Фокусировка делается, как правило, в полосе R и обязательно при высоком разрешении: CAMERA → SETUP → resolution: HIGH, и ее желательно выполнять несколько раз за ночь, особенно, если сильно меняется темпе-

¹Это относится к фотометру, установленному на AZT-8 и блоку фильтров CFW-8; барабан фильтров в блоке CFW-10 на LX-200 вращается строго в одну сторону.

ратура. Критерий хорошей фокусировки – максимальная концентрация изображения (т.е. размер изображения звезды минимален, а отсчет максимален). При наблюдениях на АЗТ-8 фокусировка делается в поляриметрической моде, и в этом случае необходимо добиваться минимального астигматизма изображений. После фокусировки нужно вернуться к разрешению MEDIUM.

6. Наблюдения выполняются в режиме GRAB. Для каждого объекта в соответствующем фильтре получаем серию кадров, которые записываются в созданную для данной даты директорию. Рабочие кадры записываются в директорию с номером кадра в серии: object00x.fit. Внимательно рассмотреть на дисплее можно только одиночный или последний кадр в серии. Остальные рабочие кадры можно просматривать, используя любую программу, работающую с FITS (FIT, FTS)-кадрами: FITSVIEW, DS9 и др. Если время экспозиции заранее не известно, то его нужно подобрать, сделав пробную экспозицию. Желательно, чтобы отношение яркости звезды к яркости фона (не путать с отношением сигнал/шум!) было больше 1.5, причем не только для самого объекта, но и для всех звезд сравнения. Меньшее отношение дает большие ошибки, но при фотометрии слабых объектов с этим приходится мириться. С другой стороны, для ярких объектов максимальный отсчет должен оставаться в области линейности, то есть для нашей матрицы не должен превышать 30000.

Для подбора времени экспозиции выполняются следующие операции. Открываем GRAB: в верхней графе задаем время экспозиции, в остальных NONE. Получаем одиночный кадр, который не нужно сохранять. По этому кадру щелкаем правой кнопкой мыши и нажимаем Crosshairs. Появится крест, который можно навести и на объект, и на фон, получить соответствующие отсчеты и подобрать время экспозиции. Как правило, время экспозиции в полосах V, B, не говоря уже об U, существенно больше, чем в полосах R и I. Это следует из кривой чувствительности матрицы (рис. 1) и из распределения энергии в спектрах большинства из исследуемых объектов. Максимальное время экспозиции для одного кадра обычно составляет не более 60^s . За это время почти не сказывается влияние неравномерности ведения телескопа. Число кадров в серии для звезд ярче 17^m как правило 5-7. Для более слабых объектов число кадров в серии можно увеличить.

7. Теперь о последовательности наблюдений. Обязательно в начале ночи прежде всего получаем 5 кадров с минимально возможной экспозицией – BIAS, определяющие уровень сигнала при нулевой экспозиции. BIAS записывается один раз в начале ночи. (См. рис. 4, 5).

Открываем GRAB:

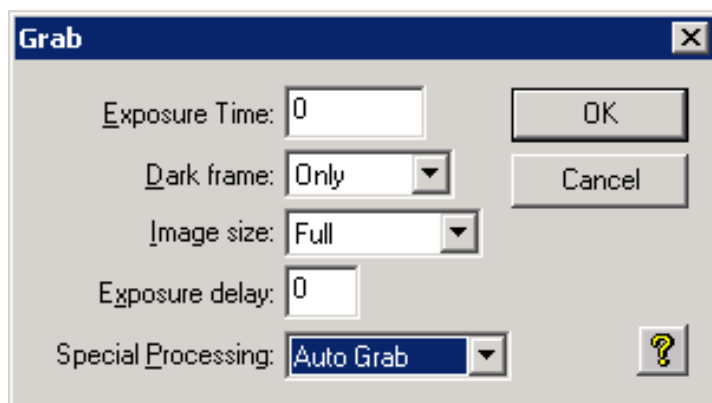


Рис. 4: 1-е окно настройки параметров CCDOPS при записи bias.

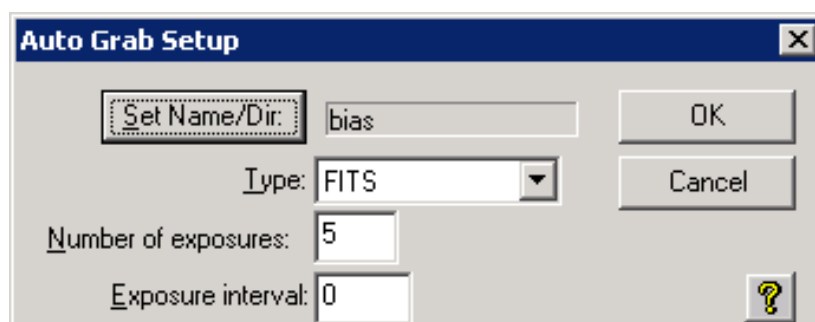


Рис. 5: 2-е окно настройки параметров CCDOPS при записи bias.

Далее записываем темновые кадры DARK (см. рис. 6). Эти кадры записываются каждые полтора-два часа, поэтому нумеруем их: dark1, dark2 и т.д. Темновые кадры делаются с максимальной используемой экспозицией, которая у нас составляет 60^s . DARKи обязательно должны быть записаны в начале и в конце наблюдений, это понадобится при обработке.

Наконец приступаем к фотометрическим наблюдениям объекта. Не забудьте записать поставленный фильтр в названии объекта. Не забудьте записать в Dark frame: NONE (см. рис. 7).

Открываем GRAB:

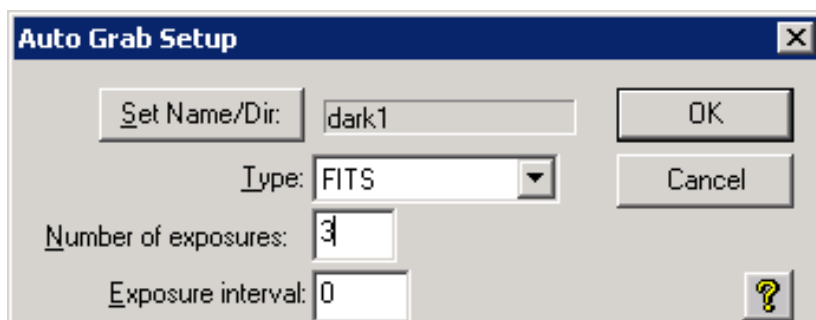


Рис. 6: Окно настройки параметров CCDOPS при записи темновых кадров.

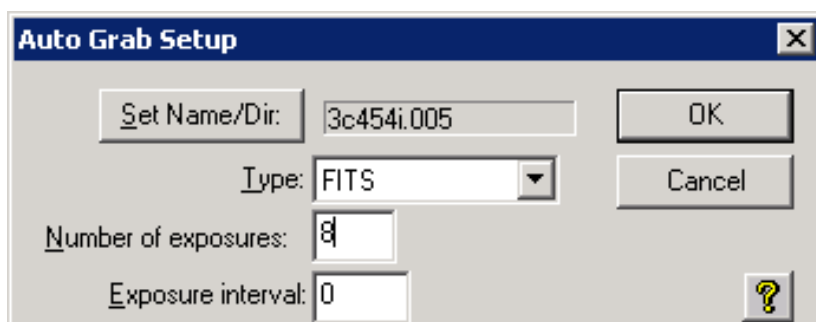


Рис. 7: Настройка параметров CCDOPS при записи объекта.

Exposure time:	записать время экспозиции в секундах
Dark frame:	NONE
Special Processing:	AUTOGRAB - число кадров в серии
Нажать Set name/Dir:	открыть директорию YYYYMMDD и написать objectfilter

OK

Закончив наблюдательную ночь (кадрами DARK), прежде всего отключаем охлаждение камеры: CAMERA → SETUP вместо **active** ставим **off**. Когда температура камеры приблизится к температуре окружающего воздуха, камеру можно выключить:

CAMERA → SHUTDOWN.

После этого можно выйти из программы CCDOPS и отключить блок питания камеры.

8. Как уже говорилось, для выявления неоднородностей поля матрицы получают плоские поля. Снимать плоские поля следует на

рассвете или на закате, когда при коротких экспозициях звезды в кадре не видны на ярком фоне. Подходящие условия недлительны, поэтому важно успеть снять поля и в фотометрической моде во всех фильтрах, и в поляризационной моде. Чтобы уменьшить влияние остаточных слабых звезд, попавших в поле, экспозиции делаются со смещением, для чего поочередно нажимаются клавиши тонкой коррекции α и δ таким образом, чтобы кадры в сумме описали прямоугольную область. Кадры плоских полей обозначаются ffe (труба телескопа к востоку от колонны) или ffw (труба телескопа к западу от колонны) с указанием фильтра.² Время экспозиции не более 5-10 сек, количество кадров в серии - 5, средний фон - не более 15000. На кадре не должно быть видно ни одной яркой (с отсчетами $\geq 1000 \div 2000$) звезды.

Телескоп LX200.

Наблюдения на телескопе LX200 ведутся в НИАИ СПбГУ с конца 2005 года. Телескоп изготовлен американской фирмой MEADE и, несмотря на небольшие размеры, признается профессиональным инструментом для высших школ и университетских научно-исследовательских программ. Оптическая схема - Шмидт-Кассегрен, апертура - $D = 406.4$ мм (16"), фокусное расстояние $F = 4064$ мм, относительное отверстие $D/F = 1/10$. Телескоп имеет вилочную монтировку и сконструирован так, что установка может быть как альт-азимутальной, так и экваториальной. У нас используется экваториальная установка.

Фотометр-поляриметр располагается в фокальной плоскости телескопа. С камерой ST-7XME масштаб изображения равен 1.1"/пиксел и поле зрения составляет 14 x 9.5 угловых минут. Предельная звездная величина $\sim 19^m$.

Телескоп полностью автоматизирован и может управляться как с пульта, так и с удаленного компьютера. В его памяти хранятся координаты и другие данные о 145 000 объектов из различных астрономических каталогов, а также имеется возможность создать собственный каталог объектов пользователя. Инициализация телескопа перед началом наблюдений полуавтоматическая с использованием GPS-приемника, точность наведения $\sim 1'$. Для включения, инициализации и управления телескопом имеется подробная инструкция.

Остановимся на особенностях работы в поляризационной моде. Понятно, что при наблюдениях через фильтр мы теряем большую часть общего светового потока. При прохождении света через анализатор световой поток от каждой звезды расщепляется на два компонента (при

²Это относится к наблюдениям на АЗТ-8.

этом фон, естественно, остается таким же по интенсивности, как и без анализатора), поэтому мы еще теряем в потоке в два раза, или 0.75 звездной величины. Диаметр телескопа LX200 невелик, и поэтому поляризационные наблюдения приемлемой точности можно выполнять только без фильтра, в полной области чувствительности матрицы. Поэтому в пустые отверстия блока фильтров фотометра, используемого на телескопе LX200, были вставлены и пластины Савара, так что можно выполнять либо фотометрию $UBV(RI)_c H_\alpha$, либо поляриметрию без фильтра. При переходе к поляризационной моде следует обязательно заново отфокусировать телескоп. Как отмечалось прежде, критерием качества фокусировки в поляриметрической моде является минимум астигматизма расщепленных изображений.

Пластина для измерения параметра Стокса Q обозначена X, для измерения параметра U — Y. Переход от фотометрической моды к поляризационной происходит просто прокруткой фильтров в CCDOPS: FILTER.

В поляризационной моде наблюдения практически ничем не отличаются от фотометрических, только для одного измерения параметров поляризации нужно получить две серии кадров — с каждой из пластин Савара.

Телескоп АЗТ-8.

Телескоп АЗТ-8, с диаметром главного зеркала 70 см, установлен в Крымской астрофизической обсерватории. В настоящее время ПЗС-наблюдения ведутся в главном фокусе телескопа, что соответствует светосиле 1/4.

Размер телескопа АЗТ-8 позволяет выполнять поляриметрические наблюдения в широкополосных фильтрах, поэтому в фотометре к блоку фильтров был добавлен идентичный ему блок, в два отверстия которого были поставлены пластины Савара, а в одно отверстие, для компенсации разницы хода лучей, вставлено прозрачное стекло той же толщины, что и у пластин. В такой комбинации фильтров и пластин можно выполнять пятицветную фотометрию и поляриметрию. Зависимость поляризации от длины волны возможно наблюдать только для сравнительно ярких объектов. Наиболее точные поляриметрические данные получаются в полосе R, поэтому большинство наблюдений выполняется именно в этой полосе, тем более что, как показывает практика, для значительной части объектов программы (активных ядер галактик) зависимость степени и позиционного угла от длины волны мала.

Поляриметрические кадры наиболее чувствительны к фокусировке, поэтому эту операцию необходимо выполнять в поляризационной моде. Нужно добиваться того, чтобы изображения были максимально круглыми и резкими (минимум астигматизма).

Более детальное описание процесса работы на АЗТ-8 содержится в соответствующей инструкции.

Методика обработки наблюдений.

Современные методы звездной фотометрии.

Фотометрия с ПЗС-приемниками сталкивается с теми же проблемами, что и фотографическая, и фотоэлектрическая фотометрия. Точность регистрации потока излучения от объекта определяется отношением сигнал/шум. Для слабых объектов, с которыми имеет дело современная астрофизика, это отношение выражается следующей формулой (см. [6,7]):

$$B = f_{\star} \frac{D(t\eta)^{1/2}}{\beta \cdot s^{1/2}}, \quad \text{где}$$

B - отношение сигнал/шум,

f_{\star} - поток излучения от объекта в квантах/см² · с,

D - диаметр телескопа в см,

t - время экспозиции в секундах,

η - квантовый выход приемника,

β - угловой размер в радианах изображения звезды на приемнике,

s - яркость фона ночного неба в квантах/см² · с · стерадиан.

Из формулы видно, что качество изображения, т. е. размер кружка, в котором содержится значительная часть света звезды, в такой же степени определяет эффективность телескопа, как и его диаметр.

Качество изображения определяется качеством оптики телескопа и искажениями волнового фронта, вызванными атмосферной турбулентностью, причем для длиннофокусных телескопов с хорошей оптикой вклад атмосферной турбулентности в размывание изображения преобладает. Распределение яркости по центральной части диска звезды хорошо представляется распределением Гаусса и занимает несколько угловых секунд, далее тянутся довольно протяженные крылья дифракционного характера. При фотометрировании основной задачей является с одной стороны максимально собрать поток излучения от звезды, а с другой - избежать влияния соседних звездных изображений. В зависимости от способа решения этой задачи современные методы фотометрии можно подразделить на две группы: апертурная фотометрия и PSF (Point-Spread-Function) - фотометрия.

Апертурная фотометрия предпочтительна в областях с небольшим количеством звезд, расположенных на значительных (превышающих размер изображения звезды) расстояниях друг от друга. Апертура выбирается в виде круга или эллипса и внутри этой области суммируются

значения интенсивности пикселей. Если суммарный поток от звезды и фона I^{S+F} измерен по N^{S+F} пикселям, а поток от фона I^F - по N^F пикселям, то инструментальная звездная величина объекта вычисляется по формуле:

$$m_{instr} = -2.5 \cdot \lg \left(I^{S+F} - \left(N^{S+F} / N^F \right) \cdot I^F \right).$$

Далее, чтобы учесть вклад обрезанной части профиля изображения, в результат вносится так называемая поправка за апертуру, которая зависит от качества изображений и определяется для каждого кадра индивидуально по одной или нескольким ярким звездам. При этом предполагается, что форма профиля для всех звезд в кадре одинакова.

То же предположение лежит и в основе PSF - фотометрии. Профиль звездного изображения задается заранее либо эмпирической функцией, либо одной из следующих модельных функций:

функция Гаусса: $G(r) \propto \exp\left(-\frac{r^2}{2\alpha^2}\right);$

модифицированная функция Лоренца: $L(r) \propto \frac{1}{1 + \left(\frac{r^2}{\alpha^2}\right)^\beta};$

функция Моффата: $M(r) \propto \frac{1}{\left(1 + \frac{r^2}{\alpha^2}\right)^\beta},$ где

α - ширина профиля, β - некоторый вещественный коэффициент.

Функция Лоренца имеет более узкие крылья по сравнению с Гауссианой, а функция Моффата - более широкие. Полученные с заданным PSF - профилем звездные величины затем исправляются за потери небольшой части потока излучения во внешних областях изображения.

Но прежде чем переходить непосредственно к фотометрии, полученные сырые рабочие кадры необходимо предварительно к этой процедуре подготовить, а это процесс хотя и не трудоемкий, но требующий сосредоточенности, особенно после длительной наблюдательной ночи.

Процедура обработки состоит из нескольких этапов:

- первичная обработка – вычитание темновых кадров
- учет плоского поля и суммирование кадров
- фотометрия
- определение параметров поляризации.

Обработка изображений.

Первичная обработка делается с использованием двух программ, написанных для пакета IDL. Желательно делать ее сразу после оконча-

ния наблюдений, потому что наблюдатель еще хорошо помнит все условия съемки, возможно, какие-то кадры испорчены облаками, метеорами, случайной засветкой, тогда их нужно удалить. После этого запускаем программу IDL и выбираем в File → Preferences → Startup директорию с рабочими кадрами, ОК. В командной строке набираем **st7blx** (для LX200) или **st7b** (для АЗТ-8) и щелкаем мышью по любому файлу в открывшемся окне директории. Программа переименовывает файлы из вида `objectname00x.fit` в вид `objectname.00x` и добавляет необходимую информацию о дате наблюдений, координатах объекта (последние, напомним, должны уже содержаться в файле `tabob.txt`), координатах и фазе Луны.

Когда программа закончит работу, появится сообщение: “all files renamed, additional information inserted in headers”. Затем вводим в командной строке **bias3smooth**. В окне директории появятся файлы вида `dark1`, `dark2`... Щелкнем мышью по любому из них. Программа сделает медианную фильтрацию всех темновых кадров, а затем вычтет `bias` и интерполированные на нужное время и экспозицию кадры `dark`. Очищенные от темновых шумов рабочие кадры будут помещены в субдиректорию GOODFITS.

Суммирование кадров

Необходимость суммирования кадров обусловлена тем, что, как правило, за короткое время экспозиции не удается обеспечить требуемое отношение сигнал/шум для объектов в кадре. В то же время делать экспозиции более 60 секунд на LX-200 и АЗТ-8 рискованно – одиночный кадр может быть испорчен пролетевшим через поле зрения спутником, космической частицей, попавшей как раз на положение исследуемого объекта, порывом ветра, дернувшем трубу телескопа и т.п.

Поэтому, чтобы получить достаточно высокое итоговое отношение сигнал/шум, снимаются несколько кадров одной и той же области, а затем складываются, с субпиксельным совмещением по звездным объектам. Для этого используется программа PREPROCESS, разработанная А. Ди Паола (Римская обсерватория) [8].

Директория, где находятся программы, выполняющие деление на плоское поле, совмещающие и суммирующие кадры в серии, называется PPR. Туда же копируются исходные рабочие кадры, желательно отдельно по каждому объекту. Название плоского поля, используемого для обработки, записывается в конфигурационном файле **imagesum.ppr**. Процесс запускается командным файлом **imagesum.bat**. В командной строке следует написать: `imagesum.bat ОБЪЕКТ`. Имя объекта задается без указания фильтра и расширения. По окончании работы в директории PPR появятся суммированные в каждом фильтре кадры, отмеченные буквой `s`. Исходные рабочие кадры из директории должны быть удале-

ны.

Примеры того, как выглядят batch-файл и конфигурационный файл см. ниже:

```
set pprpath=..\suppl\  
set path=..\suppl\  
copy %1r.* filer.*  
%pprpath%preprocess.exe imagsum.ppr -PFilter=r  
copy filers.fts %1rs.fts  
del file*.*
```

```
Param.Filter = f  
Param.File = file$(Filter)  
Param.Camera = azt8  
Compose = TRUE  
Compose.Technique = SUM  
Compose.NormalizeOn = NONE  
Compose.OffsetBy = NONE  
Compose.ResultType = INTERSECTION  
Compose.FinalImage = $(File)s.fts  
Recenter = TRUE  
Recenter.Accuracy = FULL  
Recenter.Tolerance = 3  
Recenter.MaxShift = 10  
Recenter.MinObjectsNumber = 2  
Recenter.ResamplingTechnique = LINEAR  
Recenter.SextractorFile = $(Camera).sex  
Process = TRUE  
Process.Flat = ff$(Filter).fts  
Process.Bias = #100  
Directory.TemporaryPath = c:\temp  
Source = $(File).*
```

Суммирование плоских полей происходит аналогично, только вместо **imagesum.bat** используется файл **flat.bat**. Качество плоских полей проверяется в процессе их использования. Необходимо просуммировать кадры какого-нибудь объекта и проверить однородность фона, просмотрев результирующий кадр в FITSVIEW или DS9. Если получившийся фон однороден, данное плоское поле можно использовать в течение одного - двух месяцев для всех объектов (конечно, если не происходило каких-либо изменений в оптической системе).

После суммирования рабочих кадров необходимо также просмотреть и сами кадры, и комментарии к ним. Особое внимание следует обратить

на последнюю строку в комментариях – photometric stability, она должна быть 1-2% и менее; для В и V - кадров допускается до 5%. Такие кадры далее можно фотометрировать, рассчитывая на высокую точность.

На рис. 8 и 9 приведены примеры того, как выглядят оригинальные (“сырые”) и просуммированные кадры одной и той же области.

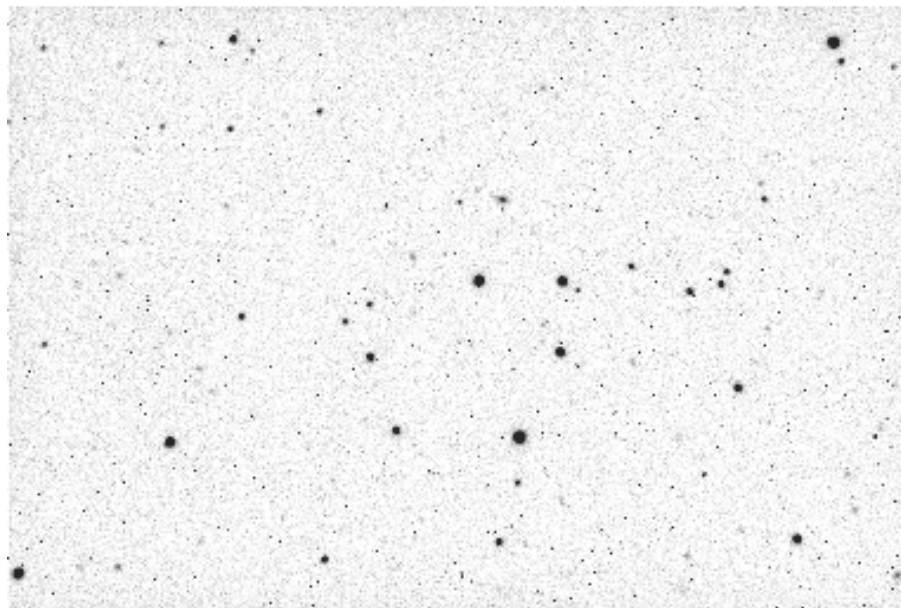


Рис. 8: Единичный кадр области квазара 3С345 в полосе I

Фотометрия

В настоящее время для обработки наблюдательных данных используются разные пакеты программ, как входящих в пакеты IRAF, MIDAS, так и самостоятельных: STARMAN, ROMAFOT, DoPHOT, DAOFOT, SExtractor и др.

В НИАИ СПбГУ при обработке данных АЗТ-8 и LX-200, а также инфракрасных фотометрических данных, полученных на телескопе АЗТ-8, разработан пакет программ по апертурной фотометрии, использующих в своей основе SExtractor [9]. Последняя версия пакета именуется PHOT0703. Особенности данного пакета являются высокая скорость обработки без потери точности получаемых результатов по сравнению с PSF-фотометрией; высокая точность определения координат объектов; удобство пользования, поскольку на каждом шаге процесс обработки можно контролировать. Пакет используется в операционных средах Windows (>2000) и OS/2, для инсталляции его требуется лишь скопировать весь пакет в рабочую директорию как целое и установить реакцию на расширение в FAR или Total Commander (File Commander для OS/2).

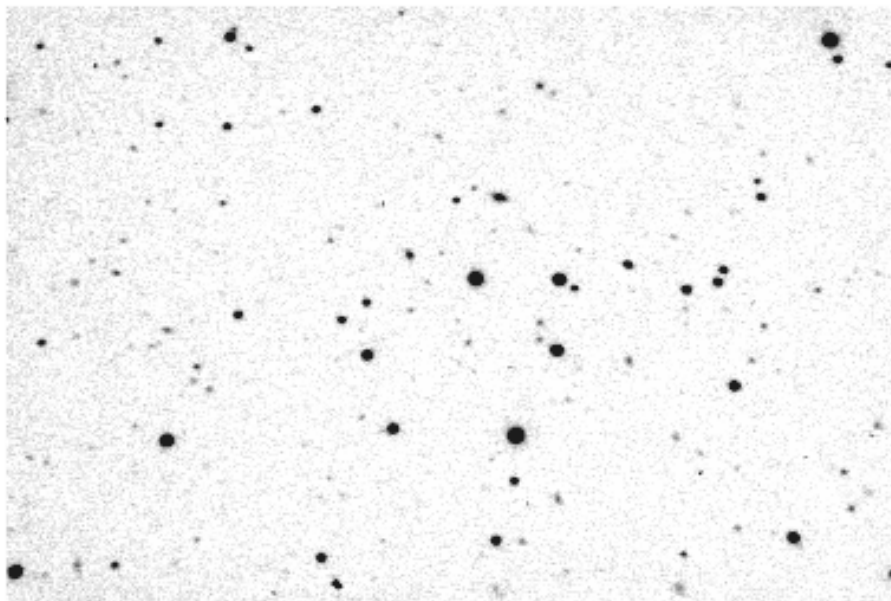


Рис. 9: Кадр той же области после вычитания темновых кадров и суммирования.

Основной составной частью пакета РНОТ0703 является программа SExtractor, с информационными и настроечными файлами, задающими входные параметры и определяющими работу этих программ. Несколько упрощенная схема работы пакета SExtractor изображена на рис. 10.

Перечислять все настроечные параметры, влияющие на работу программы и получаемые результаты, не будем, по ходу изложения упомянем только те, которые понадобятся для описания порядка действий.

Порядок работы с пакетом программ РНОТ0703.

Все файлы, необходимые для фотометрии, размещены в директории РНОТ0703.

Измерение звездной величины объекта в каждой полосе (U, B, V, R, I) осуществляется относительно группы звезд - стандартов, находящихся в одном поле с объектом. Можно использовать до 9 стандартов. Координаты (x, y) и звездные величины стандартов должны быть заранее занесены в специальный файл-маску objectname.msk, причем в первой строке этого файла должны стоять координаты объекта и некоторые произвольные звездные величины, которые в отличие от величин звезд-стандартов в дальнейшем на фотометрию не влияют. Имя маски записывается в настроечный файл PARAM.TXT. Для удобства в этот файл можно заносить неограниченное количество масок, но лишь одна строка, относящаяся к текущему объекту, должна быть раскомментирована.

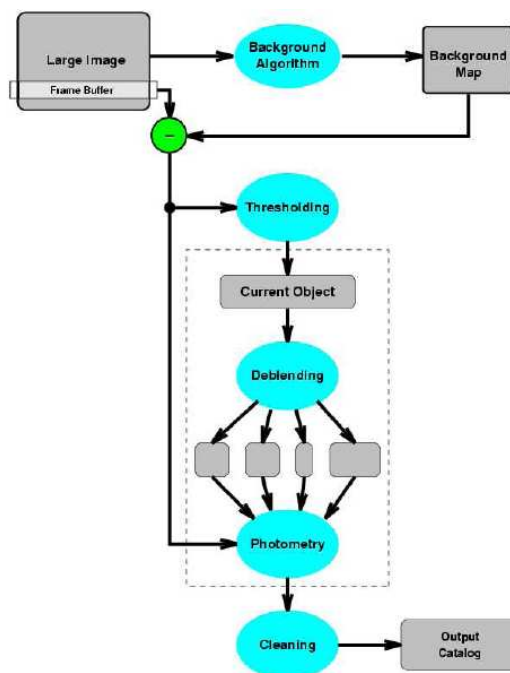


Рис. 10: Алгоритм работы пакета SExtractor [9]).

вана.

Главным настроечным файлом программы SExtractor является ASCII-файл **st7.sex**, содержащий параметры фотометрии. Наиболее существенные параметры, влияющие на качество обработки – порог обнаружения объектов в поле, пороговые значения измеряемых величин и размер ячейки для определения изменений фона по кадру. Порог обнаружения обычно устанавливается $1.5\sigma - 2\sigma$ и, если нет сильных градиентов фона в кадре, для измерения фона достаточно выбрать решетку с размером ячейки ~ 0.1 линейного размера кадра.

Для запуска программы фотометрии используется файл **sex2.bat** (для работы в ручном режиме) или **autohot.exe** (для автоматической обработки пронумерованных кадров). Чтобы программа работала в ручном режиме корректно, достаточно в FAR в меню “ассоциации файлов” внести реакцию на расширение FTS следующим образом: “sex2.bat ! fts cat”.

При работе программы вначале из директории SUPPL копируются необходимые настроечные файлы, и запускается программа SExtractor, обрабатывающая кадр с некоторой фиксированной апертурой. Создается предварительный каталог всех звездных объектов в кадре, который

содержит информацию о координатах, инструментальных звездных величинах, параметрах эллиптичности каждого объекта и ширине изображения на уровне половины максимума интенсивности (FWHM).

Следующий этап работы программы – из этого каталога создается выборка звезд, находящихся ниже порога насыщения, не блендированных с соседними звездами и достаточно ярких. По этой выборке находится среднее значение параметра FWHM для данного кадра. Как показывают результаты эмпирических исследований, оптимальное качество апертурной фотометрии достигается при использовании радиуса апертуры $\sim 1.55 \text{ FWHM} + 1$.

Далее вновь запускается SExtractor, уже с этим вновь определенным радиусом апертуры. Координаты звезд из полученного на выходе каталога сравниваются с координатами объектов из маски вручную (путем перемещения маски по визуализированному каталогу) или автоматически. Как правило, программа автоматически находит верную конфигурацию. Если этого не произошло, то возможны две основные причины, и найти верную поможет информация, содержащаяся в служебной правой части окна визуализации. Если в строке “Num. of configs” показано число конфигураций более 1, то возможно, что в плотном звездном поле есть несколько конфигураций, сходных с той, что задана в маске. Тогда можно либо вручную совместить маску со звездами, пользуясь клавишами-стрелками цифровой клавиатуры, либо “погасить” слабые звезды, нажимая клавишу “b(righter)”. Возможно, ни одной подходящей конфигурации программа не смогла найти (Num. of configs = 0). Такое бывает, если яркость объекта упала ниже стандартного порога обнаружения (5σ). В этом случае можно попытаться понизить порог обнаружения, нажимая клавишу “t(threshold) до тех пор, пока не появится объект и маска автоматически не совместится со звездами.

Простота обработки кончается там, где выясняется, что исследуемый объект, имеющий звездное ядро, имеет также и протяженную подложку (типичный случай – галактика с активным ядром, например VL Lac или Mkn501). В этой ситуации более корректной является фотометрия с фиксированной апертурой, не зависящей от размера изображений. Для таких объектов необходимо отредактировать файл `sex_auto.bat`, закоментировав строку `%path%insfwhm2` и раскомментировав (убрав “rem”) `rem %path%insfwhmf,` а в директории SUPPL того же пакета отредактировать файл `FWHM.dat`, указав в нем нужное значение апертуры (для обоих вышеназванных объектов должно быть `FWHM=8`).

В последней версии пакета фотометрических программ переход к режиму работы с фиксированной апертурой осуществляется по-иному, через редактирование файла `params.txt`. Ниже следуют примеры такого файла для апертуры, зависящей от качества изображения и с фиксиро-

ванной апертурой:

```
maskfile = 3c345
```

```
psf = 1.0
```

Это означает, что будет использоваться маска 3c345.msk, а фотометрическая апертура $a = 1.55 * fwhm + 1$

В случае же

```
maskfile = 3c371dss
```

```
psf = f8
```

используется фиксированная (f) апертура 8 пикселей.

Отредактировав настроечные файлы, можно приступить к фотометрированию. Объекты обрабатываются по очереди, но можно сразу обработать данные за несколько ночей. Все суммированные кадры, имеющие одно и то же имя, нумеруются и помещаются в субдиректорию **autophot**. Нумерация даже одного кадра будет необходима для создания таблицы результатов. При запуске программы **autophot.exe** каждый кадр будет визуализирован в (полу)автоматическом режиме, при этом должно быть видно, что звезды маски совмещены с фотометрируемыми звездами.³ По окончании работы программы для каждого fits-кадра в субдиректории появляются два файла с тем же именем, но с расширениями dat и hdr. В файле objectname.dat содержатся результаты обработки с указанием ошибки и значения FWHM (Full Width Half Maximum). Файл objectname.hdr есть повторение заголовка fits-кадра.

Для обработки фотометрии необходимо, чтобы маска содержала как минимум сам исследуемый объект и два стандарта, иначе программа не сможет совместить маску с областью. Сбои могут быть даже и при наличии двух звезд сравнения. Такие кадры обрабатываются совмещением в ручном режиме, путем нажатия соответствующих стрелок (см. правую верхнюю часть экранной выдачи).

Пример того, как выглядит процесс фотометрии на экране, показан на рис. 11.

Таблицы результатов фотометрии для каждого объекта в каждом фильтре создаются программой **tablet.exe**. На последовательные запросы программы вводятся: имя табулируемых файлов с указанием фильтра, но без нумерации и расширения; первый и последний номера файлов через запятую; имя выходного файла без расширения. В созданной таблице приводятся юлианские даты и звездные величины объекта и звезд - стандартов с оценками ошибок, а также значения FWHM всех наблюдений в данном фильтре.

Следует отметить, что программы фотометрии работают таким образом, что на выходе на основе записанных в маске звездных величин стан-

³В последней версии программы автоматической обработки, если обработка произошла благополучно (т.е. обнаружена ровно одна подходящая конфигурация), визуализация не происходит.

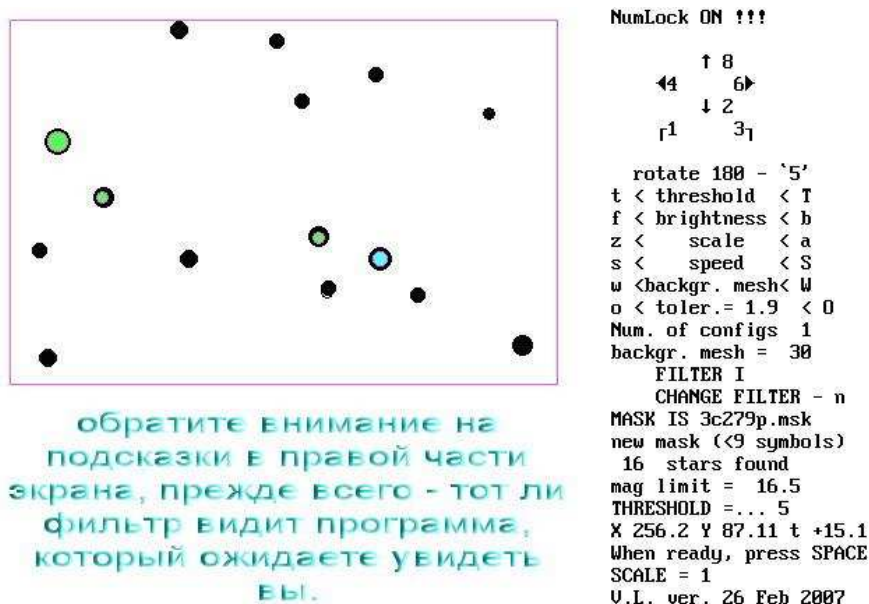


Рис. 11: Пример обработки фотометрии области квазара 3C66a

дартов мы получаем величины, скорректированные за средний уровень блеска всех стандартных звезд. В результате для переменного источника сразу можно оценить ход его переменности: возможно, в некоторые даты она вызвана переменностью одного из стандартов (это также видно по данным таблицы), тогда этот стандарт не нужно использовать.

Наконец, в субдиректории **convert_system**, если необходимо, выполняется перевод инструментальных звездных величин во всех фильтрах в стандартную систему $UBV(RI)_c$. Файл **param.txt** редактируется под обрабатываемый объект и запускается программа **standart.exe**.

Определение параметров поляризации.

Обработка поляриметрии проводится в субдиректории **POLAR3**, в который должны быть скопированы суммированные поляриметрические кадры. Первый этап почти идентичен фотометрии, за исключением того, что перед визуализацией каждого кадра программа спросит, в каком фильтре делается обработка⁴. На запрос нужно ввести название фильтра. При визуализации в правом нижнем углу выдается информация об угле поворота камеры, его обязательно нужно запомнить. (На иллюстрации (рис. 11) этот угол равен 15.1°).

⁴При обработке поляриметрии на LX-200 этот запрос не выдается, поскольку наблюдения производятся без фильтра

Файлы с именами объектQrs.dat, объектUrs.dat, образованные по завершении обработки (каждый кадр обрабатывается индивидуально, а не в режиме **autophot**), содержит координаты компонентов, звездные величины, полученные по суммированным потокам компонентов, степень поляризации в данном положении анализатора, расстояние между компонентами и позиционный угол между ними.

При дальнейшей обработке будем исходить из того, что звезды-стандарты (по крайней мере в среднем) неполяризованы или, по крайней мере, параметры их поляризации неизменны. В первом случае мы получим истинные значения степени поляризации и позиционного угла объекта, во втором – эти значения будут смещены относительно истинных на некоторую постоянную величину, подлежащую отдельному определению.

Если параметры поляризации измерялись в полосе R , то далее в командной строке запускается **polparR.bat** объект. В открывшемся окне экранного вывода показываются полученные значения нуля-пункта позиционного угла для обоих поляриметрических кадров. Если все сделано верно, то различие в этих нуля-пунктах не превосходит нескольких десятых долей градуса, а сами значения углов совпадают с теми, которые выводились на экран при обработке. В противном случае надо повторить обработку заново. В результате этого этапа обработки будет получено два файла – объектPrall и объектPPPr.

В первом из этих файлов содержатся полученные параметры – юлианские даты, звездные величины, степень и ошибка поляризации, значение и ошибка позиционного угла, а также FWHM как для объекта, так и для всех стандартов. Это позволяет проконтролировать поведение стандартов и, в случае необходимости, исключить какой-либо из них из маски.

Второй файл содержит только данные по самому исследуемому объекту, с вычтенными параметрами для звезд-стандартов, в предположении того, что они имеют инструментальное и/или межзвездное происхождение.

При обработке данных за несколько ночей достаточно повторить вышеописанную процедуру, и если имя объекта одно и то же, то вновь обработанные данные будут дописаны в файлы объектPrall и объектPPPr.

Фотометрия по поляриметрическим кадрам.

Значительное число программных объектов для экономии времени на телескопе АЗТ-8 в полосе R наблюдается лишь в поляриметрическом режиме. В этом случае обработка поляриметрии осуществляется так, как описано в предыдущем параграфе. Что же касается фотометрии, то ее необходимо делать в субдиректории *PHOT_POLAR*, аналогично тому, как делается обычная фотометрия, предварительно пронумеровав кад-

ры. В процессе обработки будут усреднены оценки блеска, относящиеся к двум компонентам расщепленного изображения, а таблица результатов будет выглядеть точно так же, как и для фотометрических кадров.

Литература

1. Физика МДП приборов. Глава 5, часть 2. Электронное учебное пособие. http://dssplab.karelia.ru/%7Eivash/MOPT_b/texts/glava5_2.html
2. Неизвестный С.И., Никулин О.Ю., "Специальная техника №№ 4-5, 1999 г. <http://www.ess.ru/publications/articles/nikulin2/nikulin.htm>
3. Овчинников А.М., Ильин А.А., Овчинников М.Ю. Принцип работы и устройство активно-пиксельных датчиков. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Препринт. http://www.keldysh.ru/papers/2003/prep85/prep2003_85.html
4. Милчев М. , Daily Digital Digest, Тенденции в цифровой фотографии. Часть 3 (ПЗС-матрицы), <http://www.3dnews.ru/digital/photo-matrix/print>
5. Милчев М., Сердце цифровой фотокамеры. ПЗС матрица. <http://www.ferra.ru/online/digiphoto/s27151/>
6. Щеглов П.В., Проблемы оптической астрономии, 1980, изд.Наука
7. Дроздовский И., Фотометрия звезд в тесных полях. <http://www.astro.spbu.ru/WWW/staff/dio/StPhoto/StPhoto.html>
8. Di Paola A., Preprocess, <http://preprocess.mporzio.astro.it/>
9. Bertin, E. & Arnouts, S., 1996, Astronomy & Astrophysics Supplement, 117, 393, http://terapix.iap.fr/rubrique.php?id_rubrique=91

Оглавление

Введение.	1
Приемники ПЗС. Общие понятия.	1
Наблюдения	6
Фотометрические наблюдения с ПЗС камерой ST-7XME.	6
Телескоп LX200.	12
Телескоп AZT-8.	13
Методика обработки наблюдений.	14
Современные методы звездной фотометрии.	14
Обработка изображений.	15
Суммирование кадров	16
Фотометрия	18
Порядок работы с пакетом программ PHOT0703.	19
Определение параметров поляризации.	23
Фотометрия по поляриметрическим кадрам.	24
Литература	26