

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке ФГАОУ ВПО  
«Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России  
Б.Н.Ельцина», кандидат физико-  
математических наук, доцент

В.В.Кружаев

« 21 » апреля 2015 г.



**Методика позиционных наблюдений слабых объектов  
на телескопе SBG**

Директор Коуровской астрономической  
обсерватории, кандидат физико-математических  
наук, старший научный сотрудник

П.Е.Захарова

г. Екатеринбург, 2015 г.

## **Оглавление**

Общие положения, ссылки.....	3
Отличие SBG от «астрономического» телескопа.....	4
Методика проведения наблюдений.....	6
Обработка полученных данных.....	9

## Общие положения, ссылки

В основе всех методов позиционных наблюдений, которые могут осуществляться на телескопе SBG, лежит принцип относительной астрометрии. Он заключается в том, что видимые координаты объекта определяются по отношению к опорным звездам при обработке снимка участка неба. Это предъявляет определенные требования как к конструкции телескопа, так и к методам наблюдений и обработки. Сам телескоп не является угломерным инструментом, его задача — обеспечить получение снимков. Вследствие этого обязательным атрибутом последующей обработки является каталог точных положений звезд.

В данном методическом руководстве приведены указания для работы с модернизированным телескопом SBG, работающим в Коуровской астрономической обсерватории. Этот телескоп радикально отличается от первоначальной фотографической версии камеры SBG, выпускавшейся предприятием Carl Zeiss в 1960–70 гг. Новый телескоп SBG имеет ПЗС-камеру и автоматизированные приводы, управляемые компьютером, что позволило поднять работу с ним на качественно новый уровень. Наиболее полное описание телескопа можно найти в [1], техническое описание и инструкцию по эксплуатации — в [2], описание отдельных аспектов, связанных с телескопом — в [3] и [4]. Методики наблюдений во многом обусловлены типом светоприемника — ПЗС-камерой, поэтому полезными могут оказаться общие приемы работы с ПЗС, описанные, например, в [5], [6]. Описание пакета Maxim DL, используемого управляющей программой телескопа, дано в [7].

## Отличие SBG от «астрономического» телескопа

Основное назначение телескопа SBG состоит в наблюдении искусственных спутников Земли (ИСЗ). С точки зрения наблюдателя главное отличие между обычными астрономическими объектами и ИСЗ заключается в характере видимых движений. Для отслеживания звезд достаточно вращать телескоп вокруг одной оси с постоянной угловой скоростью  $15''$  в секунду. При наблюдении спутников ситуация может оказаться намного сложнее. При экваториальной монтировке телескопа для отслеживания ИСЗ могут понадобиться любые скорости в диапазоне от нуля до бесконечности, которые, к тому же, необходимо плавно изменять со временем. Ориентация полюса монтировки телескопа в полюс орбиты объекта позволяет ограничить максимальную скорость величинами порядка  $2^\circ\text{--}3^\circ$  в секунду, но необходимость плавного изменения скоростей по двум осям сохраняется.

Телескоп SBG имеет 4-осную горизонтальную монтировку с датчиками углового положения и моторами на 3-й и 4-й осях. Эти две оси образуют систему, полюс которой при помощи вспомогательных осей 1 и 2 может быть направлен в произвольную точку неба, а координаты и компоненты скоростей контролируются компьютером. Главная оптическая система телескопа — это камера Шмидта с главным зеркалом диаметром  $D = 42.5$  см и фокусным расстоянием  $F = 78.8$  см, в фокусе которой размещена ПЗС-матрица Arcee Alta U-32 размером  $2184 \times 1472$  пикселей, каждый со стороной  $6.8$  мкм. На снимке запечатлевается участок неба с угловыми размерами около  $60' \times 40'$ . Служба времени комплекса является системой реального времени, регистрирующей на аппаратном уровне моменты открытия и закрытия затвора по шкале UTC с точностью до  $0.0001$  секунды.

В настоящее время нет необходимости в оптических наблюдениях низколетящих ИСЗ, т.к. эту нишу заполняют радарные наблюдения. Низколетящие объекты как правило являются яркими и именно при работе с ними приходилось ориентировать полюс монтировки телескопа в полюс

орбиты. Высокоорбитальные и промежуточные ИСЗ всегда имеют достаточно большие участки траекторий, удаленные от полюса мира. На этих участках их видимые скорости в экваториальной системе координат не являются большими, поэтому такие объекты удобнее наблюдать с обычной экваториальной конфигурацией монтировки. Это экономит время (не требуется переориентации первой и второй осей для разных объектов) и избавляет от необходимости перевода координат из экваториальной системы в собственную («повернутую») и обратно. В настоящем методическом руководстве речь идет о наблюдении *слабых* объектов, что в случае ИСЗ ассоциируется с их большими расстояниями и, как следствие, с большими полуосями орбиты. Поэтому в силу вышесказанного здесь описываются методики наблюдений на телескопе SBG, выполняемые при экваториальной конфигурации монтировки, т.е. как у обычного астрономического телескопа. В таком режиме, тем не менее, SBG имеет одно ключевое для наблюдений ИСЗ преимущество – возможность плавно менять скорости движения по двум осям. Если имеется предварительная эфемерида объекта, телескоп может автоматически следить за ним. При фотографировании слабых объектов это может сыграть решающую роль.

Слабыми объектами, наблюдаемыми на SBG, могут быть также астероиды и кометы. При их наблюдении телескоп SBG обычно используют в режиме астрономического телескопа и методика наблюдений на нем мало отличается от таковой при «классических» астрономических наблюдениях. Есть только два небольших отличия, одно из которых связано с преимуществом SBG по сравнению с обычным телескопом, а второе – с недостатком. Первое состоит в автоматическом гидировании (слежении). Скорости, отрабатываемые приводами осей 3 и 4, могут как угодно мало отличаться от скорости суточного вращения неба, что и дает такую возможность. Однако, на снимках, полученных на телескопе SBG при слишком больших экспозициях, становится заметной деформация изображений (кружков рассеяния). Начинает себя проявлять обратная

сторона преимуществ 4-осной монтировки. Этот недостаток состоит в следующем. Для того, чтобы монтировка имела возможность постоянно трансформироваться, т.е. иметь изменяемое положение полюса, первые две оси могут вращаться и снабжены лимбами для отсчета азимута и зенитного расстояния. Их точность равна  $0.1^\circ$ , приспособлений для дополнительной юстировки нет. В силу этого точность ориентации полярной оси телескопа в полюс мира имеет тот же порядок величины. При экспозициях свыше 3-х минут становятся заметными эффекты, связанные с недостаточно точным направлением полярной оси. С другой стороны, оптика SBG имеет большую светосилу, а ПЗС-матрица — высокую чувствительность, так что длительные экспозиции мало востребованы.

### **Методика проведения наблюдений**

Технические вопросы работы с телескопом SBG и конкретные инструкции для действий наблюдателя в различных режимах приведены в [2]. Поэтому здесь мы их не касаемся и просто подразумеваем, что наблюдатель имеет все необходимые навыки управления данным телескопом. Приведенные ниже методические указания в большей степени будут иметь отношение к объекту наблюдения.

Пусть телескоп готов к наблюдениям: ось Z направлена в полюс мира, энкодеры проверены, матрица охлаждена, оптическая система отфокусирована. Записаны условия наблюдений: температура воздуха, давление. Начинать наблюдения необходимо с получения снимков, так называемых *байеса* и *плоского поля*. Это калибровочные снимки, необходимые для учета положения нуль-пункта и неоднородной чувствительности ПЗС-матрицы по полю, а также функции пропускания оптической системы. Фиксация байеса не требует времени, не считая 3-х секунд на выгрузку изображения. Съемка плоского поля выполняется обычно

в сумерках, когда небо уже заметно потемнело, но звезд невооруженным глазом еще почти не видно. Эта часть сумерек очень скоротечна и яркость неба изменяется быстро. Необходимо успеть подобрать экспозиции и сделать снимки, на которых уровень фона как можно больший, но не превышает максимального отсчета. Снимок с отсчетом на фон в 50% от максимума можно считать удовлетворительным. Динамический диапазон камеры Argee Alta U-32 ограничен сверху значением 65535, следовательно, желательно получить снимки с уровнем фона выше 33000. Типичные экспозиции при этом на телескопе SBG — несколько секунд. Необходимо получить около 5 снимков плоского поля, которые в дальнейшем будут обработаны и усреднены в один главный снимок плоского поля («master flat field»). Чтобы в дальнейшем медианное усреднение (для удаления следов начинающих проявляться звезд) на отдельных снимках было возможным, съемку необходимо вести при неподвижной трубе телескопа (с *выключенным* астроприводом). Если плоское поле не удалось снять во время вечерних сумерек, можно сделать это в утренних сумерках. Однако, заранее откладывать съемку плоского поля на утро не следует: может испортиться погода.

После того как достаточно стемнеет, можно приступать к наблюдениям самого объекта. Определитесь, с какой экспозицией будете выполнять его фотографирование. Наведите телескоп на объект, запустите слежение (если собственное движение объекта мало, можно просто включить астропривод). Перед тем как снимать объект, сделайте несколько *темновых снимков* (с закрытым затвором) с такой же экспозицией. При последующей обработке с их помощью устраняются тепловые шумы матрицы, портящие изображение. После этого снимайте объект. Если температура ПЗС-матрицы постоянна, можно ограничиться темновыми кадрами, снятыми только до или после съемки объекта. В противном случае темновые снимки необходимо получать как до, так и после фотографирования объекта. Их количество зависит от той задачи, для решения которой снимки будут использованы в дальнейшем. Для

фотометрии, чем больше будет темновых снимков, тем выше будет точность определения вклада теплового шума и, следовательно, измерения звездной величины. В этом случае требуется получить от 15 до 20 темновых снимков, а для обеспечения очень высокой точности — до 60 снимков. Для *позиционных наблюдений*, для которых служат эти методические указания, такое количество темновых снимков является избыточным. В обычных условиях достаточно сделать 1–3 снимка на объект, а если состояние ПЗС-камеры стабильно, то для получения темновых снимков можно выделить отдельное время. И сделать их с десяток. Дело в том, что основное влияние на вычисление координат нормально различимого изображения оказывают так называемые «горячие пиксели». Вычитание усредненного темнового кадра из «рабочих» снимков объекта очищает изображение достаточно, чтобы это не влияло на его координаты. Однако, если объект предельно слаб, то его сигнал флуктуирует на уровне фона. У изображения нет нормального профиля и о координатах его центра тяжести можно лишь догадываться. В этом случае, чем больше будет получено снимков самого объекта и темновых кадров, тем лучше. Основные трудности здесь приходится преодолевать не при наблюдении объекта, а при обработке снимков. Для модернизированного телескопа SBG предельная звездная величина близка к 19. Объекты 16-й звездной величины 16 получаются за время экспозиции 10 секунд.

Принцип относительной астрометрии предъявляет определенные требования и к количеству звезд, изображения которых получаются на снимке наряду с изображением объекта. Чем больше будет опорных звезд (т.е. звезд из каталога) на снимке, тем выше будет точность определения координат объекта. Это также надо учитывать при позиционных наблюдениях. Не следует рассчитывать на яркие звезды в качестве опорных, т.к. их изображения могут оказаться искаженными блюмингом (растеканием заряда вследствие переэкспонирования). Стандартная для SBG точность в 1" достигается, если для астрометрической обработки взято несколько десятков (20–30) звезд. В настоящее время в каталогах положений звезд практически



нет «пустых мест», так что при нормальных условиях наблюдения на любой площадке  $60' \times 40'$  всегда найдется достаточное количество звезд.

Завершать наблюдения желательно снова получением темновых снимков. Даже если бы они абсолютно не отличались от снятых ранее, то и этот факт был бы полезен: он указал бы на то, что в течение ночи оборудование работало нормально, на матрице не появилось участков с отклонениями.

### **Обработка полученных данных**

Для астрометрической обработки ПЗС-кадров, получаемых на телескопе СБГ, в Коуровской астрономической обсерватории УрФУ разработан программный комплекс FitsSBG.

Начальными данными для обработки являются: ПЗС-кадр в fits-формате, момент начала экспозиции, длительность экспозиции, приближенные координаты центра кадра.

Основные этапы работы комплекса.

1. Чтение fits-файла с учетом уровня отсеечения шумов, задаваемого пользователем программы, выделение областей связности.
  - Предусмотрен режим предварительного просмотра, поддерживающий произвольно низкий уровень отсеечения шумов и возможность выделения слабых объектов в кадре вручную.
2. Анализ областей связности, фильтрация шумов, выделение элементов изображения, которые могут являться звездами или объектами.
3. Анализ элементов изображений, выделение из их числа звезд и, в зависимости от режима работы, объектов. Реализованы три алгоритма разделения изображений звезд и объектов.
  - Звезды — штрихи одинаковой длины (допустимое различие длин штрихов является параметром программы), объекты выбирает

пользователь среди оставшихся областей связности, не классифицированных как шумы.

- Звезды — точечные изображения. В ходе астрометрической обработки определяются координаты всех объектов, не отождествленных с опорным каталогом.
  - Звезды — точечные изображения, объекты выбирает пользователь.
4. Автоматическое отождествление опорных звезд по каталогам Tycho2 и UCAC2.
  5. Определение координат объектов.

При наблюдении слабых объектов следует использовать предварительный просмотр с возможностью выделения слабых объектов в кадре вручную.

## Список использованных источников литературы

1. Гламазда Д.В. Модернизированный телескоп SBG Коуровской обсерватории. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 2014.
2. Комплекс «Небесный патруль». Руководство пользователя. Коуровская АО, 2007.
3. Glamazda D.V. SBG Camera of Kourovka Astronomical Observatory // *Astrophysical Bulletin*. 2012. Vol. 67. No 2. P. 230–236.
4. Glamazda D.V. Principal Algorithms for the Control of Kourovka Observatory SBG Camera // *Astrophysical Bulletin*. 2012. Vol. 67. No 2. P. 237–244.
5. Steve B. Howell. *Handbook of CCD Astronomy*, 2nd ed. Cambridge University Press, 2006.
6. Лазовский Л. Приборы с зарядовой связью: прецизионный взгляд на мир. СПб.: АВТЭКС, 2001.
7. MaxIm DL: CCD Imaging Software, version 4. Diffraction Limited, 1997–2006.
8. Кузнецов Э.Д., Захарова П.Е. Программный комплекс для обработки ПЗС-наблюдений ИСЗ на телескопе СБГ Коуровской астрономической обсерватории // *Околосемная астрономия 2009*. Сборник трудов конференции, Казань, 22–26 августа 2009 г. М.: ГЕОС, 2010. С. 267–269.