К ПРОБЛЕМЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАБЛЮДЕНИЙ С ВЫСОКИМ СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ НА БТА

В. Е. Панчук, В. С. Шергин, М. В. Юшкин, М. В. Якопов

Специальная астрофизическая обсерватория РАН
369167б Россия, Нижний Архыз
e-mail: panchuk@sao.ru

Рассматриваются факторы, снижающие эффективность наблюдений с высоким спектральным разрешением на 6-метровом телескопе. Проводится анализ резервов повышения эффективности наблюдений и проиллюстрированы основные этапы модернизации комплекса спектральной аппаратуры высокого разрешения и системы управления БТА.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность астрономической спектроскопической аппаратуры обычно определяется через квантовую эффективность приемника излучения и фактор широкощельности спектрографа. В качестве дополнительного параметра рассматривают число одновременно регистрируемых элементов спектра. Можно выделить три способа влияния на эффективность спектроскопии. Самый распространенный – это выбор комбинации телескоп/спектрограф, которая является наиболее эффективной для конкретной наблюдательной задачи. Более сложным является выбор оптимального спектрального разрешения на данном телескопе – этот способ предполагает корректировку параметров существующего прибора или возможность создания нового спектрографа. На примере БТА мы рассмотрим третий вариант: параметры оптики телескопа и спектрографа неизменны, и повышение эффективности спектроскопических наблюдений идет за счет действий, которые выглядят как второстепенные. Выделим составляющие эффективности спектроскопических наблюдений звезд: астроклимат, качество оптики телескопа, наведение и сопровождение объекта, пропускание оптики спектрографа, стабильность спектрографа, возможность использования вспомогательной оптики, управление телескопом и спектрографом, снижение потерь информации при обработке данных наблюдений, снижение потерь наблюдательного времени, связанных с квалификацией наблюдателя.

КОЛИЧЕСТВО НАБЛЮДАТЕЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Статистика наблюдений на БТА с 1975 г. показала, что прогнозы числа ясных ночей, выполненные по данным кратковременных метеорологических наблюдений (четыре срока: утром, днем, вечером и ночью), для предгорий Северного Кавказа представляются ненадежными. В современной практике оперируют числом ясных ночных часов, определяемым по данным отчетов астрономов-наблюдателей. Астрономы, работающие на БТА, в официальных отчетах фиксируют время, затрачиваемое на наблюдения. При этом не учитывается ясное время, когда наблюдения не выполняются из-за ограничений по скорости ветра ($V > 10$ м/с) или из-за ограничений по разности температур “зеркало – атмосфера” ($|\Delta T| > 10°$C). С другой стороны, не все время, отмеченное как наблюдательное, следует рассматривать как полностью ясные ночные часы. Для оценок числа ясных часов мы использовали систему непрерывного мониторинга ночного неба (в архив таких наблюдений изображения записываются один раз в 20 минут). Из полученного таким образом числа ясных часов мы исключаем время, когда наблюдения не выполнялись по вышеуказанным технологическим ограничениям. Скорость ветра и ход температур мы определяем по данным метеорологического мониторинга. Потери наблюдательного времени из-за сильного ветра составляют, в среднем, не более 300 часов в год, и приходятся, в основном, на зимний период. Оценка потерь, выполняемая по графику скорости ветра, является завышенной, т. к. сильный ветер наблюдается и в пасмурные дни. Оценка потерь по перепаду температур, выполненная по архивам системы сбора метеорологических данных, составляет 50–60 часов ночного времени, причем поправки за счет пасмурного времени незначительны, т. к. резкое понижение температуры сопровождается исчезновением облачности (если она была). Итак, основные потери ясного времени обусловлены скоростью ветра, а потери по разности температур (когда $|\Delta T| > 10°$C), составляют 4–5 ночей. Суммарные потери по метеоусловиям (облачность) и по технологическим ограничениям (скорость ветра и перепад температур), составляют в среднем 1266 часов в год. При максимально возможном числе ясных ночных часов 2890 за год, суммарное время наблюдений, по отчетам астрономов, составило 1280 часов за год. Суммарное время, когда башня БТА (по решению наблюдателя) открыта, составляет в среднем 1624 часа. Это 20% различие в оценках имеет разные причины: например, калибровка аппаратуры в вечерние и утренние сумерки не учитывается астрономом как наблюдательное время. Мы считаем эту разность основным резервом повышения эффективности спектроскопических наблюдений, включая сумеречное время, когда возможны наблюдения в красном и ближнем ИК-диапазонах.

ТЕПЛОВАЯ ИНЕРЦИЯ ЗЕРКАЛА

Кросс-корреляционный анализ, проведенный нами по данным непрерывного мониторинга температур за несколько лет, выявил запаздывание температуры зеркала относительно температуры подкупольного пространства на 1.6 суток. Значительная тепловая инерционность зеркала ограничивает возможности его подготовки к предстоящим наблюдениям. К наблюдениям в ближайшую ночь подготовка температуры зеркала принципиально невозможна, к наблюдениям во вторую ночь подготовка осложнена тем, что в первую ночь могут состояться наблюдения, в течение которых основное воздействие на зеркало оказывает свободная атмосфера, а не система охлаждения подкупольного пространства. Анализ температурных зависимостей для разных сезонов показывает, что активными методами воздействия на температуру подкупольного пространства можно дополнительно получить для наблюдений не более 20 часов в год. Анализ диаграмм спектра мощности для скорости ветра показал, что потери из-за ограничений по скорости ветра могут быть снижены за счет прогноза понижения скорости ветра на интервалах более двух часов. За счет таких прогнозов можно получить не менее 50 часов дополнительного наблюдательного времени в год.

КАЧЕСТВО ОПТИКИ ТЕЛЕСКОПА

По данным аттестации главного зеркала (ГЗ) в цеховых условиях, угловой диаметр кружка рассеяния ϵ_q, содержащий долю энергии q, составляет: $\epsilon_{0.5} = 0.4$ сд, $\epsilon_{0.9} = 0.8$ сд. Это означает, что в кружке рассеяния диаметром 0.4 сд собирается 50% света, а в кружке рассеяния диаметром 0.8 сд собирается уже 90% света. Предположим, что в фокусе Нэсмита установлен спектрограф, ширина щели которого (при условии достижения высокого спектрального разрешения) составляет 0.4 сд. Тогда при идеальных атмосферных условиях в спектрограф попадет только 50% света, собранного телескопом. Для эшеле-спектрографа фокуса Нэсмита (НЭС) [4] изготовлены резатели (рассекатели) изображения, позволяющие (без потери спектрального разрешения) использовать практически всё изображение звезды, если оно не превышает 2 сд. В результате указанное качество оптики телескопа не приводит к потерям света при спектроскопии высокого разрешения. Иначе обстоит дело с деградацией коэффициента отражения алюминиевого слоя зеркала. Измерения коэффициента отражения "свидетеля зеркала" (пластинки, алюминированной одновременно с ГЗ), дают 64, 58 и 48%, на длине волны 4000, 3500 и 3000 Å соответственно, тогда как в красном диапазоне коэффициент отражения равен 75–77% (данные 2008 года). Потому, при спектроскопии в наземном ультрафиолете следует учитывать уменьшение эффективной площади телескопа в 1.6 раза.

КАЧЕСТВО ЗВЕЗДНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Официальная статистика качества звездных изображений на БТА никогда не публиковалась. Оценки диаметра звездных изображений, фиксируемые спектроскопистами в журнале наблюдений, весьма субъективны (например, зависят от регулируемых параметров телевизионного подсмотра щели спектрографа). При разработке резателя изображений мы руководствовались нашей среднестатистической оценкой – 2 сд. Статистику качества изображений, выполненную по цифровым архивам наблюдений на БТА, мы опубликуем в отдельной работе.

ТОЧНОСТЬ СОПРОВОЖДЕНИЯ ОБЪЕКТА

При сравнении эффективности различных телескопов зачастую оперируют только двумя параметрами: число ясных ночных часов и качество изображений. При этом предполагается, что сопровождение телескопом объекта является идеальным. В действительности наличие ошибок геометрии телескопа (биение оси "Z", особенности работы приводов, неперпендикулярность осей, ошибки юстировки оптической схемы телескопа и т. д.) заставляло наблюдателя выполнять частую коррекцию процесса ведения, компенсируя внеосевое положение объекта и неравномерность ведения телескопа. При ручной коррекции автоматическая система управления (АСУ) БТА работала в режиме переходных процессов

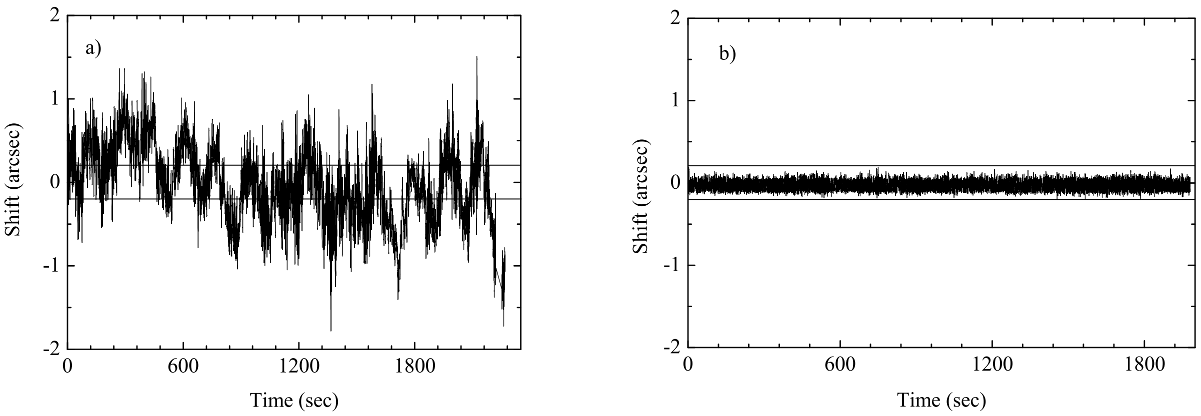

Рис. 1. Колебания центра тяжести изображения звезды без локального корректора (a), с работающим локальным корректором (b)

с возбуждением всего спектра колебаний телескопа. Ошибки геометрии были скомпенсированы в новой системе управления, после чего возбуждение спектра колебаний происходило реже, преимущественно из-за ветровых нагрузок, а также из-за ошибок гидирования, допускаемых неквалифицированными наблюдателями. Кардинально проблема потерь света из-за колебаний изображения звезды на входе спектрографа была решена нами путем разработки локальных корректоров изображения, устанавливаемых в фокусе Нэсмита и в главном фокусе БТА. Управление корректором интегрировано в АСУ БТА: монотонные тренды рассогласования компенсируются путем коррекции программного ведения, а высокочастотная составляющая – путем оптико-механической коррекции непосредственно в фокусе телескопа. На рис. 1 приведены результаты измерений смещений центра тяжести изображения звезды в главном фокусе БТА, полученные без локального корректора (рис. 1, a) и с работающим корректором (рис. 1, b). Горизонтальными линиями отмечена ширина щели 0.4 сд, при которой обеспечивается спектральное разрешение $R = 80\,000$.

ПРОПУСКАНИЕ ОПТИКИ СПЕКТРОГРАФА

В течение последнего десятилетия наблюдения на БТА с высоким спектральным разрешением базируются, в основном, на системы с коллимированными пучками диаметром 240–260 мм. Это не позволяет применять высокоэффективные диэлектрические покрытия основных оптических поверхностей. Камера спектографа НЭС выполнена из плавленого кварца, по схеме Шмидт–Кассегрен–Манжен. Элементом скрещенной дисперсии являются сменные дифракционные решетки. Такое решение обеспечивает высокое пропускание спектрографа как в видимом, так и в наземном ультрафиолетовом диапазонах.

СТАБИЛЬНОСТЬ СПЕКТРОГРАФА

Проблема эксплуатации спектрографов высокого разрешения, установленных на подвижной платформе телескопа, рассмотрена в [1]. Здесь только отметим, что пессимизм наших коллег относительно стабильности оптико-механической конструкции спектрографа НЭС, включающей мозаичную эшеле, не оправдался. При неподвижном телескопе самым нестабильным элементом спектрографа является модуль светоприемника. В режиме наблюдений основным источником сдвигов спектральных линий является переменный (при различных зенитных расстояниях Z) характер заполнения коллиматора спектрографа от трехзеркальной схемы Нэсмита, связанный с деформациями трубы телескопа (по закону $\sin Z$, типичному для схемы Серюрье). Спектрографы фокуса Нэсмита оснащены системой датчиков температуры воздуха и температуры элементов конструкции. Наблюдаемые вариации температуры и давления несущественны, и дополнительная термостабилизация объема спектрографов не требуется. Итак, основные источники позиционных сдвигов не связаны с оптико-механической конструкцией спектрографа НЭС, а определяются состоянием телескопа и светоприемника.

ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ ОПТИКА

В качестве вспомогательной оптики рассматриваем гид БТА и подсмотры входа в спектрографы. Подсмотр "щели" снабжен цветными фильтрами, что снижает потери на входе спектрографа, связанные с атмосферной дисперсией. В настоящее время гид БТА состоит из двух телескопов. Установлен 14-см рефрактор, оснащенный телевизионной матрицей ПЗС с внутренним усилением, регистрируемое изображение участка звездного неба автоматически отождествляется. Прежний телевизионный гид БТА [2], практически неиспользуемый 70-см рефлектор, реконструируется в фотометрический телескоп. Дело в том, что для некоторых объектов, наблюдаемых на БТА с высоким спектральным разрешением, необходимы параллельные фотометрические наблюдения, организовать которые на другом телескопе не удается. Кроме того, в процессе наблюдений используются широкоугольные камеры обзора неба.

УПРАВЛЕНИЕ ТЕЛЕСКОПОМ И СПЕКТРОГРАФОМ

Возможность оперативно изменить диапазон длин волн, регистрируемый с высоким спектральным разрешением, изменить входные параметры спектрографа, установить те или иные предщелевые устройства (интерферометр Фабри–Перо, абсорбционную йодную ячейку, анализатор линейной и круговой поляризации), направить свет в тот или иной спектрограф – обеспечивается системой управления спектрографами фокуса Нэсмита. Дистанционная смена режимов наблюдений позволяет переходить к другой научной программе в тех случаях, когда основная научная программа невыполнима, что дает возможность более эффективно использовать наблюдательное время с переменными погодными условиями (при ухудшении качества изображения, уменьшении прозрачности атмосферы, переменной облачности и т. д.).

ОБРАБОТКА НАБЛЮДЕНИЙ

Созданная система обработки двумерных изображений эшеле-спектров учитывает особенности оптических схем спектрографов БТА и условия эксплуатации спектрографов. В системе обработки предусмотрены следующие типы изображений: а) спектры, получаемые с резателем изображений, б) спектры, получаемые с анализатором поляризации, в) спектры, получаемые с анализатором поляризации в сочетании с резателем изображений, г) спектры, получаемые с абсорбционной йодной ячейкой. Многолетняя эксплуатация и совершенствование системы обработки наблюдений позволила сформулировать концепцию контролируемого спектрографа [3], которая, по нашему мнению, должна сменить концепцию спектрографа с высокой степенью стабилизации оптико-механических параметров.

ВЫВОДЫ

Квантовая эффективность современных матриц ПЗС приблизилась к технологическим пределам. Поэтому дальнейшее повышение эффективности спектроскопических наблюдений с высоким спектральным разрешением мы связываем с развитием комплекса технических решений, перечисленных выше.

Работы частично поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 07-02-00247-а и 09-07-00492-а) и Программой Отделения физических наук РАН.

[1] *Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Юшкин М. В., Насонов Д. С.* Измерения лучевых скоростей на звездных спектрографах БТА // Астрофизический бюллетень. – 2008. – **63**. – С. 410–418.

[2] *Маларев В. А.* Поисково-гидирующая система Большого Азимутального Телескопа // Оптико-механическая промышленность. – 1977. – вып.**7**. – С. 32–36.

[3] *Панчук В. Е., Юшкин М. В.* Анализ точностных характеристик спектроскопических наблюдений // Оптический журнал. – 2006. – **73**. – С. 60–64.

[4] *Панчук В. Е., Клочкова В. Г., Юшкин М. В., Найденов И. Д.* Спектрограф высокого разрешения 6-метрового телескопа БТА // Оптический журнал. – 2009. – **76**. – С. 42–55.