

УДК 524.31-325.4;520.353

ИЗМЕРЕНИЯ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ НА ЗВЕЗДНЫХ СПЕКТРОГРАФАХ БТА

© 2008 В. Г. Клочкова¹, В. Е. Панчук¹, М. В. Юшкин¹, Д. С. Насонов¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 21 апреля 2008 г.; принята в печать 15 мая 2008 г.

Проблема повышения точности измерений лучевых скоростей V_r звезд решается применительно к спектральной аппаратуре БТА (Большой Телескоп Азимутальный). Рассмотрены причины, ограничивающие точность спектроскопических определений V_r , как в целом, так и для данной конструкции телескопа и башни.

Key words: *методы астрономических наблюдений, приборы и инструменты*

1. ОШИБКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

Измерение лучевых скоростей звезд V_r является важной частью деятельности вот уже четвертого поколения спектроскопистов. Точность определения V_r всегда рассматривалась как один из критериев состояния спектроскопии на том или ином телескопе. Существуют десятки факторов, определяющих точность измерения, наиболее значимые из них перечислены в [1]. Всю совокупность причин ошибок определения V_r , можно разбить на четыре группы.

1. *Нестабильность осветительной системы.* Здесь подразумеваем как эффекты, вызванные нестабильностью атмосферных условий (переменность качества изображения, прозрачности, атмосферной дисперсии, положения звезды на входе спектрографа), так и систематические эффекты, связанные с неточной юстировкой оптической системы телескопа. Характер последних изменяется в зависимости от положения объекта наблюдения в горизонтальной системе координат.
2. *Нестабильность конструкции спектрографа.* Это наиболее очевидная группа эффектов, имеющая длительную историю со времени применения первых подвесных спектрографов. Различают механическую нестабильность, обусловленную различной ориентацией спектрографа относительно вектора силы тяжести, и термическую — из-за температурных изменений оптико-механической конструкции. Кроме того, следует принимать во внимание изменения

показателя преломления воздуха, связанные с изменениями температуры, влажности и давления в объеме спектрографа.

3. *Нежесткость светоприемника.* Термин “нежесткий светоприемник” обязан своим появлением в основном эпохе применения электронно-лучевых приборов (ЭОПы, ТВ-трубки и др.). Он возник из-за того, что стабильность их фокусирующих систем было технически трудно поддерживать в течение длительного времени. Нежесткость фотографических материалов определялась свойствами подложки (стекло, пленка), а также изменением со временем свойств светочувствительного слоя (старение желатинины). Заметная нежесткость твердотельных светоприемников (матриц ПЗС) была неожиданной (см. ниже).
4. *Неоднозначность процедур извлечения позиционной информации (систем обработки).* При измерениях положений спектральных линий с помощью микроскопов и спектрокомпараторов результат в значительной степени зависел от квалификации измерителя, а именно от способа выбора центра линии и точности наведения на этот центр, способа борьбы с эффектами прогрева эмульсии и отсчетных устройств. Свободный от личных ошибок метод осциллоскопического компаратора характеризовался ошибками, связанными с прогревом эмульсии и отсчетных устройств со стороны осветителей, а также с одновременным измерением различных спектральных деталей. Неоднозначность цифровых систем

обработки определяется применением различных полиномов, аппроксимирующих дисперсионные кривые, количеством линий, по которым строятся дисперсионные кривые, а также особенностями алгоритмов извлечения одномерных спектральных векторов из двумерных изображений спектров.

Все эти группы ошибок в разной степени учитывались при создании и эксплуатации аппаратуры БТА (Большой Телескоп Азимутальный), ориентированной на спектроскопию звезд, а также при разработке методов, имеющих конечной целью измерения лучевых скоростей.

2. ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ СПЕКТРОВ

Еще при создании 6-метрового телескопа сложилось априорное мнение, что спектрографы, размещаемые на подвижной части альт-азимутальной конструкции БТА, не будут обладать высокой стабильностью и, следовательно, “жанр” высокоточного определения лучевых скоростей звезд не будет доминирующим в САО (для таких задач оптимальным считался спектрограф стационарного фокуса кудэ телескопа на экваториальной монтировке). По первоначальному плану оснащения 6-метрового телескопа комплект дифракционных спектрографов (СП-160, СП-161, СП-124, ОЗСП) предполагалось дополнить дифракционным спектрографом с интерферометром Фабри-Перо (ИФП), а также бесщелевым спектрографом Линника с интерференционными реперами [2]. Последние два прибора могли бы сыграть свою роль в задаче высокоточных измерений лучевых скоростей, но в начале 70-х “попали под сокращение” списка спектральной аппаратуры БТА и на телескопе не появились. Уже на этапе заводской приемки стало ясно, что оптимальным для позиционных спектроскопических измерений является планетный спектрограф СП-124 [3], а менее пригодным — Основной звездный спектрограф ОЗСП [4]. В 1967 г. был введен в эксплуатацию штатный спектрограф фокуса кудэ 2.6-м телескопа КрАО [5], причем конструкция спектрографа обеспечивала высокостабилизированный температурный режим. А в 1975 г. на 6-метровом телескопе был введен в эксплуатацию ОЗСП, конструкция которого находилась практически в атмосфере подкупольного пространства башни БТА.

На первом этапе исследования позиционной стабильности ОЗСП обнаружилось, что в течение экспозиции на длиннофокусной камере ($F = 3157$ мм) спектральные линии заметно размываются, поэтому выигрыш в спектральном разрешении по сравнению со светосильной камерой

($F = 604$ мм) незначителен [6], а потери в светосиле по потоку (из-за усложненной оптической схемы длиннофокусной камеры) были велики. Первый период исследований терморезима ОЗСП усложнялся необходимостью частых посещений наблюдателем объема спектрографа, но все же в качестве основной причины нестабильностей спектра был назван вертикальный градиент температуры в объеме ОЗСП, и были предприняты меры по термоизоляции спектрографа (в частности, площадка, на которой находилась щелевая часть ОЗСП, была закрыта пластиковым павильоном). Подчеркнем, что в работе [6] измерялась температура воздуха в различных точках объема ОЗСП, и никаких корреляций изменений температуры с положением спектральных линий никогда не было обнаружено. Дальнейшие исследования показали, что при работе с длиннофокусной камерой положение линий в спектре в основном реагировало на смену механических состояний телескопа (профилактика АСУ БТА, наведение на объект и сопровождение объекта). Одним из авторов (В.Е.П.) было показано, что при поочередной регистрации спектра на длиннофокусной и светосильной камерах сдвиги линий имеют общий монотонный характер (Рис. 1). Так как объемы камер различаются и имеют разную защищенность, а характерное время сдвигов линий и монотонность сдвигов не согласуются с природой конвекции, то тезис о конвективной природе сдвигов был признан ошибочным. После первых двух часов работы телескопа сдвиги линий прекращались, поэтому было сделано предположение (В.Е.П.), что основной причиной нестабильности спектра, регистрируемого на длиннофокусной камере, являлось изменение в механической конструкции ОЗСП, вызываемое прогревом опоры оси “Z” вследствие изменения температуры масла в первые часы работы БТА. В последующие часы в металлоконструкции устанавливался, по-видимому, тепловой баланс, и дрейф линий прекращался. В дальнейшем был рекомендован прием предварительной термостабилизации несущей конструкции ОЗСП, путем включения маслосистемы за два часа до начала наблюдений и заблаговременного открывания купола телескопа. Широкощельность ОЗСП при работе с длиннофокусной камерой составляла всего 2.6, и для обеспечения проектной разрешающей способности ширина входной щели не должна была превышать 0.15". Поэтому положение линий в спектре было нечувствительно к положению изображения звезды на щели. Итак, точность позиционных измерений на ОЗСП с длиннофокусной камерой ограничивалась ошибками 2-й группы (механическая нестабильность спектрографа). Роль этих ошибок удалось снизить

за счет изменения режима эксплуатации спектрографа и телескопа.

При работе со светосильной камерой ($F = 604$ мм) обычно устанавливалась щель шириной $0.45''$. В этом случае основной вклад в ошибки измерения лучевой скорости вносила неоднозначность положения центра изображения звезды на щели, причем этот эффект был более выражен при хороших изображениях. Ошибки, связанные с жесткостью несущей конструкции ОЗСП, здесь отходили на второй план. Опытные наблюдатели обеспечивали точность измерения лучевых скоростей на светосильной камере ОЗСП не хуже 2 км/сек [7]. Эта точность была в среднем вдвое ниже точности, достигаемой в те времена на камерах спектрографов фокуса кудэ (подчеркнем, что на более длиннофокусных камерах телескопов меньшего диаметра). Уже при первых наблюдениях на ОЗСП была обнаружена нестабильность положения звезды на щели, с основной частотой около полугерца. Амплитуда этой нестабильности могла увеличиваться до 2 -х угловых секунд, если труба телескопа испытывала ветровые нагрузки, или если наблюдатель выбирал неудачный режим (темп) ручной коррекции положения телескопа. В связи с этим напомним о специфической проблеме ОЗСП БТА — точности определения лучевых скоростей при длительных экспозициях получались выше, чем по стандартам лучевых скоростей, большинство из которых оказались слишком яркими для БТА. Из-за указанных колебаний ошибки по ярким звездам завышались, а при длительных экспозициях эти же колебания положения звезды снижали их.

Основные состояния теплового режима ОЗСП можно распределить на три периода: а) спектрограф до теплоизоляции (с 1975 по 1979 г.), когда температура объема ОЗСП быстро реагировала на температуру подкупольного пространства, и эти вариации мешали выявить основную причину нестабильностей спектра; б) спектрограф после теплоизоляции (с 1979 по 1999 г.), когда температура объема и металлоконструкции ОЗСП медленно реагировала на изменение температуры масла в гидравлической системе подшипников оси “Z”; в) спектрограф после переноса маслостанции оси “Z” с опорно-поворотной части БТА в изолированное помещение и перехода на активное охлаждение масла (с 1999 г.), когда поступление тепла в ОЗСП при работающем телескопе практически прекратилось. Добавим, что с начала 90-х ОЗСП переведен на дистанционный режим наблюдений, что также положительно отразилось на тепловом режиме объема спектрографа. Результаты исследований этих тепловых режимов и соответствующие ссылки приведены в [8]. Здесь ограничимся замечанием, что тепловая инерционность объема

ОЗСП увеличилась практически до полусуток, т.е. быстрые изменения температуры подкупольного пространства (зачастую сопровождающие начало и завершение наблюдений) отражаются на тепловом режиме ОЗСП уже в дневное время. Градиенты изменения температуры воздуха в ОЗСП при этом не превышают $0.2^\circ/\text{час}$.

Что касается проникающей способности ОЗСП, то здесь обнаружились расхождения (приблизительно на одну звездную величину) между теоретическими оценками [9] и статистикой наблюдений. Только после создания и ввода в эксплуатацию локального корректора положения звезды в фокусе Нэсмита [10] удалось количественно показать [11], что проникающая способность спектроскопии высокого разрешения на БТА многие годы существенно понижалась колебаниями телескопа в режиме сопровождения объекта, т.е. теоретические оценки (выполненные для идеального телескопа и спектрографа), не были сильно завышенными.

Основной объем фотографических наблюдений, связанных с измерением положений спектральных линий, был выполнен на светосильной камере ОЗСП, причем в большей части программ измерялись дифференциальные сдвиги линий (для построения кинематических разрезов атмосфер сверхгигантов, или для определения смещения фотосферного спектра относительно межзвездных абсорбций, или для измерения продольной компоненты магнитного поля по зеемановскому расщеплению поляризованных компонент). В тех случаях, когда требовалось точное знание лучевой скорости, в качестве стандартов использовались линии теллурического спектра или линии, формирующиеся в межзвездной среде [7]. К сожалению, в САО так и не была налажена массовая оцифровка фотографических спектрограмм, что, в частности, не позволило использовать для определения лучевых скоростей корреляционные методы. Поэтому все спектры регистрировались до нормальной фотографической плотности, когда положения отдельных линий можно было уверенно измерять на осциллоскопическом компараторе [12]. Процедура измерений была трудоемкой, требовала особой подготовки измерительного прибора и квалификации сотрудника (чтобы “обогнать” тепловой дрейф измерительного прибора, фрагмент спектрограммы должен был быть измерен достаточно быстро). Ошибка определения лучевой скорости по одной фотографической спектрограмме, полученной на светосильной камере ОЗСП (с обратными линейными дисперсиями 7 , 9 и $14 \text{ \AA}/\text{мм}$), не превышала 2 км/сек. Период фотографической регистрации спектров звезд на ОЗСП БТА затянулся до

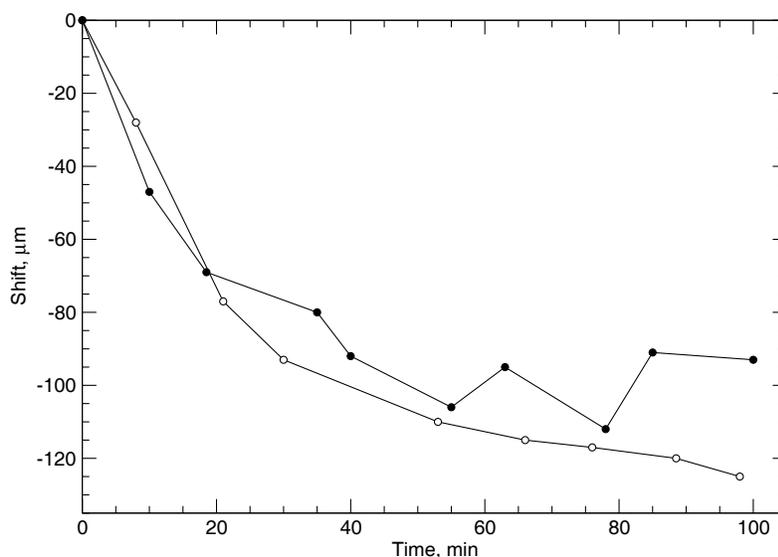


Рис. 1. Сдвиги линий на длиннофокусной камере № 1 (светлые кружки) и светосильной камере № 2 (темные кружки) ОЗСП. Величины смещений, полученные по спектрограмме камеры № 2, пересчитаны на масштаб камеры № 1 с использованием отношения фокусных расстояний камер $3157 : 604 = 5.23$. Сдвиги линий измерялись в первые два часа работы телескопа в режиме слежения за объектом.

1985 г., что затрудняло переход на методы фотоэлектрической регистрации (статистика использования ОЗСП с различными светоприемниками приведена в [13]).

Во второй половине 70-х получил широкое распространение корреляционный фотоэлектрический метод измерения лучевых скоростей, предложенный в [14] и проверенный экспериментально в [15]. Этот метод, не требующий высокой широкощельности, применялся на телескопах различных диаметров [16–18], относительная простота наблюдений и обработки сделала метод популярным и продуктивным. Однако попытки реконструировать один из спектрографов БТА (планетный спектрограф СП-124) в корреляционный измеритель лучевых скоростей, предпринятые в начале 80-х сотрудниками кафедры физики космоса Ростовского университета, не увенчались успехом.

Подводя итог первому десятилетию измерений лучевых скоростей на БТА, можно сказать, что, работая с точностью, достаточной для большинства задач того времени, астрономы при этом серьезно проигрывали в проницающей способности фотографического метода определения лучевых скоростей по сравнению с одноканальным фотоэлектрическим методом. Основной причиной здесь оказалось отсутствие систем массовой оцифровки спектров, открывающей возможность применения корреляционных методов, т.е. работы с относительно низким уровнем сигнал/шум. Подчеркнем, что в наиболее продуктивном режиме использования ОЗСП (со светосильной камерой Шмидта) основным источником ошибок измерения лу-

чевых скоростей является поведение телескопа и астронома-наблюдателя, но никак не неоднородность температуры воздуха в объеме спектрографа. И все же положительным результатом длительных рассуждений о конвекции в объеме ОЗСП было решение строить новый спектрограф, располагая его элементы в горизонтальной плоскости балкона фокуса Нэсмит-2.

3. СПЕКТРОСКОПИЯ НА СИСТЕМАХ СЧЕТА ФОТОНОВ (1985–1990)

Особый период развития техники измерения лучевых скоростей был связан с применением на БТА одномерных и двумерных телевизионных систем счета фотонов. Эти светоприемники в основном применялись в спектроскопии низкого и среднего разрешения. В системах высокого разрешения двумерный счетчик фотонов применялся с 1989 г. на светосильной и длиннофокусной камерах ОЗСП [19], а также на автоколлимационном спектрографе ЭСПАК [20], конструкция последнего предусматривала возможность использования как системы счета фотонов, так и первых матриц ПЗС. На БТА, как и на других телескопах, где позиционная устойчивость спектра определялась не оптико-механическими свойствами спектрографа, а преимущественно условиями эксплуатации многокаскадного электронно-оптического преобразователя, применение “нежесткого” светоприемника не привело к прогрессу в точности измерения лучевых скоростей. Вследствие небольшого динамического диапазона системы счета фотонов не позволяли

получать хорошо накопленный сигнал за время, когда нестабильностями системы электронной фокусировки еще можно было пренебречь, так что повышение точности измерения положений линий за счет увеличения отношения сигнал/шум было также невозможным. В целом внедрение систем счета фотонов привело к резкому увеличению проникающей способности спектроскопии, при ощутимых потерях в позиционной и фотометрической точности. Этот период наблюдений не обозначился особыми результатами в спектроскопии высокого разрешения на БТА (см. [21]).

4. СПЕКТРОСКОПИЯ С МАТРИЦАМИ ПЗС

Реальные и мнимые недостатки ОЗСП БТА, связанные с распределением оптико-механических узлов спектрографа по четырем этажам опоры оси зенитных расстояний (оси "Z"), привели к идее создания спектрографов высокого разрешения, целиком расположенных на 4-м этаже опоры, на платформе фокуса Нэсмит-2 [19]. Несколько таких спектрографов скрещенной дисперсии, ориентированные на применение матриц ПЗС, были последовательно созданы [20, 22, 23] и выдержали несколько модификаций. В 1996 г. был построен эшелле-спектрограф первичного фокуса (PFES) [24, 25], который использовался для спектроскопии более слабых объектов.

С 1993 г. ОЗСП используется, в основном, в режиме регистрации на матрицах ПЗС, которыми оснащалась светосильная камера. После внедрения на БТА приборов высокого разрешения со скрещенной дисперсией ОЗСП можно было рассматривать как второстепенный прибор для позиционной спектроскопии, но первостепенный по проникающей способности при наблюдениях в избранных спектральных интервалах [13]. Так как светоприемники, используемые на ОЗСП, устанавливались и на другие приборы, то проводить систематические исследования позиционной стабильности этого спектрографа было затруднительно, и мы ограничились мониторингом теплового режима объема ОЗСП [8]. Ниже остановимся на проблемах позиционной стабильности спектрографов скрещенной дисперсии (далее эшелле-спектрографов).

Эксплуатация первых эшелле-спектрографов (с диаметром коллимированного пучка $d = 100$ мм), оснащенных матрицей ПЗС 530×580 элементов, показала, что позиционные точности, получаемые на ОЗСП с этой же матрицей, превзойдены. Это превосходство достигалось как за счет большего числа линий, регистрируемых на эшелле-спектрографе за одну экспозицию, так и за счет увеличения спектрального разрешения R . Точность

измерения лучевых скоростей на первых версиях эшелле-спектрографа Рысь (диаметр коллимированного пучка $d = 100$ мм) составляла 200 м/сек, что позволило, в частности, возвратиться к задаче мониторинга атмосфер горячих сверхгигантов на новом технологическом уровне и впоследствии получить принципиально новые результаты [26].

Создание и ввод в эксплуатацию кварцевого спектрографа с большим диаметром коллимированного пучка [23] сопровождалось утверждениями о том, что: 1) эксплуатировать мозаичную эшелле на подвижном спектрографе окажется невозможным, 2) роль механических и температурных нестабильностей конструкции будет основной. Сразу после ввода спектрографа НЭС в опытную эксплуатацию были выполнены исследования позиционной стабильности [27]. Спектры регистрировались в различных режимах работы БТА и при различной ориентации трубы телескопа. Оказалось, что основным источником позиционной нестабильности является не оптико-механическая конструкция спектрографа, а модуль светоприемника, матрицы ПЗС форматом 1140×1060 элементов, т.е. нестабильность измерительного устройства (матрицы) оказалась более существенна, чем искомые эффекты в конструкции спектрографа. Вывод был подтвержден исследованиями данного светоприемника на других спектрографах, включая стационарный лабораторный ДФС-8. Этот тип нестабильностей, по-видимому, определяется особенностями конструкции модуля светоприемника, охлаждаемого жидким азотом, т.к. характер нестабильностей изменялся в процессе расходования азота (Рис. 2). В 2001 г., после оснащения спектрографа НЭС матрицей 2048×2048 элементов [28], исследования нестабильности были повторены, амплитуда сдвигов линий уменьшилась втрое (подчеркнем, что модуль этой матрицы не имеет системы подогрева входного окна).

Только при исследовании эшелле-спектрографа PFES с $d = 50$ мм [24], устанавливаемого в кабине первичного фокуса БТА, и оснащенного матрицей ПЗС 1140×1060 элементов, удалось обнаружить нестабильности, связанные с деформациями механической конструкции спектрографа, отделив их от нестабильностей светоприемника [25]. Величина этих нестабильностей оказалась типичной для подвесного дифракционного спектрографа (Рис. 3), ошибки определения лучевой скорости на этом приборе составляли 0.5–1 км/сек.

Сдвиги спектра сравнения обнаружены и для спектрографов, размещенных в неподвижных помещениях. Вариации положения спектра, эквивалентные изменениям лучевой скорости на 20 и 100 м/с, обнаружены на эшелле-спектрографе, установленном в фокусе кудэ 2.7-м телескопа, на

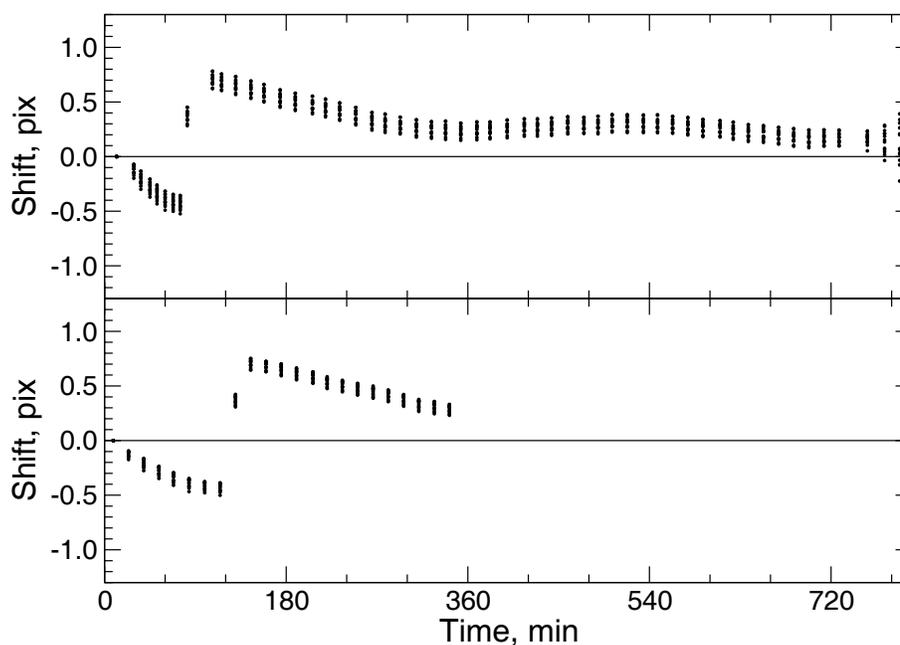


Рис. 2. Величины относительных сдвигов спектра калибровочной лампы как функции времени, отсчитанного от момента заливки жидким азотом криостата модуля светоприемника. На верхней и нижней панелях представлены результаты двух экспериментов, каждая точка — результат определения сдвига по отдельному эшелле-порядку.

характерных временах порядка минут и часов соответственно [29]. Смещение спектра на оптоволоконном эшелле-спектрографе 1.5-м телескопа за 4.5 часа соответствует ошибке 200 м/с [30]. Нестабильность кудэ-эшелле-спектрографа сверхвысокого разрешения ($R = 250000$), установленного на 1.5-м телескопе с адаптивной оптикой [31], соответствует ошибке 37 м/с, накопленной в течение часа (при этом зарегистрировано смещение спектра на 0.17 пикселя). В работах [30, 31] эти сдвиги непосредственно связываются с поведением светоприемника.

Относительные отверстия камер спектрографов ОЗСП, Рысь и НЭС равны (1 : 2), поэтому роль эффекта неточного удержания изображения звезды на щели, в линейной мере (долях пикселя), должна быть одинакова. Но соответствующие ошибки измерения лучевой скорости снижаются по мере увеличения спектрального разрешения (при переходе от ОЗСП ($R = 14000$) к спектрографу Рысь ($R = 28000$) и далее к НЭС ($R = 60000$)).

Следующим шагом в повышении точности измерения лучевых скоростей было использование локального корректора положения звезды [10] и резателя (рассекателя) изображения [32]. Тщательная настройка режима работы локального корректора позволяет однозначно устанавливать и удерживать изображение объекта на входе спектрографа. Влияние эффектов атмосферной дисперсии можно понизить, используя в канале телевизионного подсмотра щели турель с цветными свето-

фильтрами (таким образом сопровождение объекта контролируется в том же диапазоне, который регистрируется спектрографом в данную экспозицию). Резатели изображения, кроме очевидного выигрыша путем увеличения результирующего отношения сигнал/шум, обеспечивают дополнительный выигрыш в точности σV_r за счет перемешивания апертуры в тонких призмочках. По спектрам с $R = 60000$ было получено, что внутренняя ошибка измерения лучевой скорости по отдельным линиям изменяется обратно пропорционально квадратному корню из числа использованных линий. Эта ошибка составляет (с матрицей ПЗС $2K \times 2K$) в среднем 24 м/с для спектров с узкими линиями (малометаллические субкарлики в синем и УФ диапазонах), и 60 м/с для спектров с более широкими линиями (например, сверхгиганты) [33].

5. ПРОБЛЕМА РАССОГЛАСОВАНИЯ КАНАЛОВ

Под рассогласованием каналов подразумевают эффекты, связанные с неодинаковым заполнением оптики спектрографа излучением исследуемой звезды и источника спектра сравнения. Добавим, что характер этого рассогласования может быть переменным, если конфигурация оптики телескопа обеспечивает переменный характер заполнения оптики спектрографа от одной и той же звезды, наблюдаемой в разное время на разных зенитных расстояниях. При внутренней точности измерения

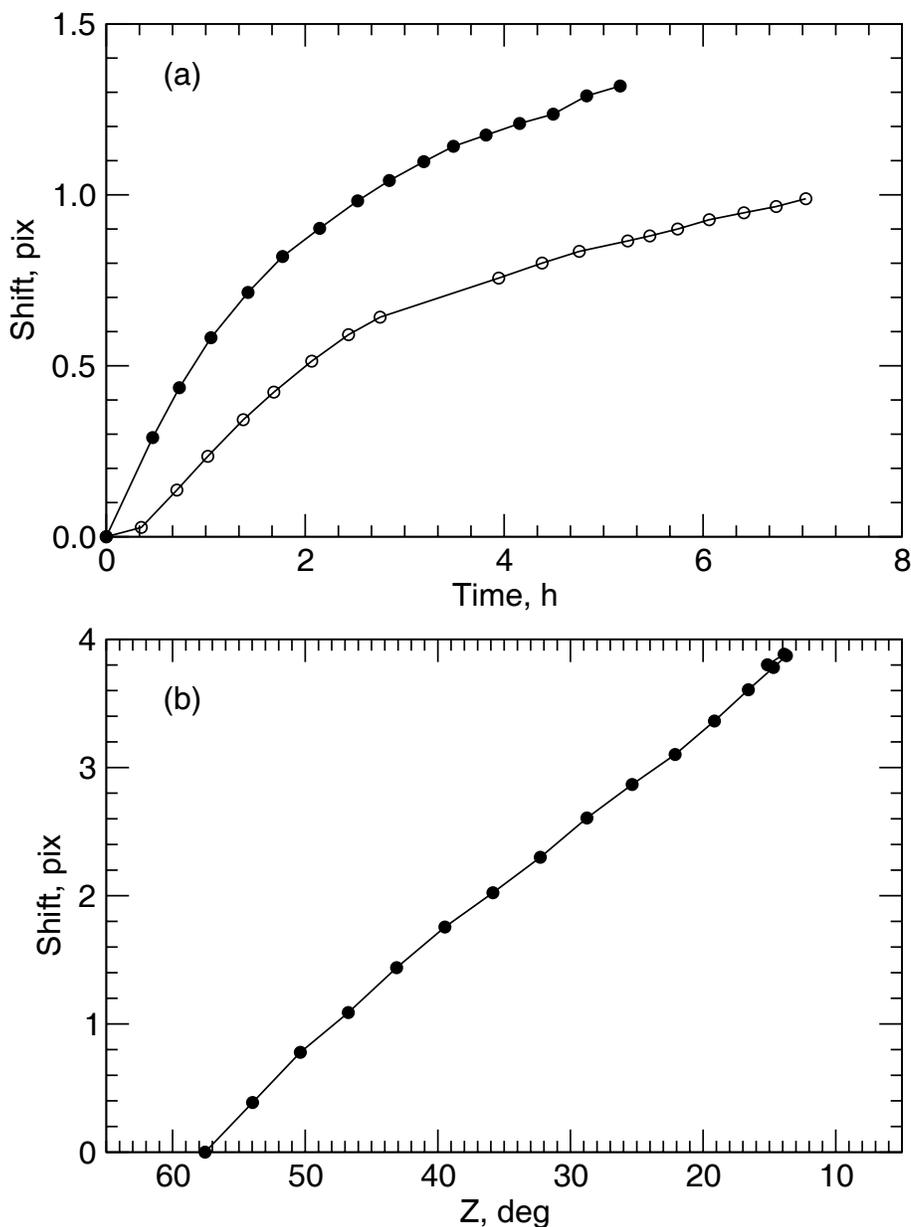


Рис. 3. Определение относительных смещений спектра калибровочной лампы для подвешного спектрографа (PFES), установленного в первичном фокусе телескопа БТА: (а) — результаты двух экспериментов при неподвижном телескопе, показаны относительные сдвиги спектра сравнения как функция времени; (б) — результат измерения смещения спектра сравнения как функция зенитного расстояния при сопровождении телескопом объекта. Каждая точка — усредненное значение относительного сдвига по всем эшелле-порядкам.

спектрограммы лучше 100 м/с, рассогласование каналов оказывается доминирующим источником ошибок, определяя внешнюю точность метода. Оно лучше всего иллюстрируется путем вычисления точечных диаграмм, формируемых различными зонами оптики спектрографа. Из-за различного вклада aberrаций от разных зон, в случае неодинакового (или переменного) характера заполнения оптики спектрографа исследуемым и реперным излучением, положение центров тяжести линий изменяется. Вследствие этого возникают ошибки привяз-

ки спектров, как систематические (когда заполнение оптики исследуемым и реперным излучением различается, но имеет стационарный характер), так и случайные (в случае переменного характера заполнения оптики спектрографа светом звезды). Рассогласование каналов может вносить ошибки σV_r также и через различия в форме дисперсионной кривой, построенной по линиям спектра сравнения и по линиям спектра дневного неба. В отдельных случаях, например, при построении спектральных атласов, эти различия в форме дисперсионной кри-

вой необходимо было учитывать. Строго говоря, проблема рассогласования каналов уже не является проблемой собственно спектрографа, а также отражает состояние юстировки оптики телескопа в многозеркальной схеме.

Наиболее распространенным способом частичного устранения последствий рассогласования каналов является привязка дисперсионной кривой, построенной по спектру сравнения, к положению линий теллурического спектра (если накопленный сигнал достаточен для измерения этих линий) или к ионосферным эмиссиям (если наблюдаемый объект недостаточно яркий). Можно построить дисперсионную кривую непосредственно по линиям теллурического спектра, в этом случае рассогласование каналов устраняется, но точность ограничивается недостаточным количеством таких линий. Наш опыт показывает, что при устранении рассогласования опорного и звездного каналов (при использовании теллурического спектра) внешняя точность классического метода возрастает более чем в 3 раза. В этом случае точность ограничивается уже недостатком линий теллурического спектра и эффектом дифференциальной атмосферной рефракции. Эти недостатки устраняются путем использования абсорбционной ячейки и применением компенсатора атмосферной дисперсии (или применением компенсатора вращения поля).

Некоторые авторы демонстрируют высокие позиционные характеристики спектрографа, измеряя спектр рассеянного солнечного света (дневное небо). Подчеркнем, что точность σV_r , оцениваемая для данного спектрографа по спектру рассеянного солнечного света, всегда завышена (в несколько раз!) вследствие того, что основные эффекты (рассогласование каналов, дифференциальная атмосферная рефракция, точность сопровождения объекта) в этом случае отсутствуют.

Если исследуются только положения линий, то информация о форме профилей, интенсивностях и эквивалентных ширинах не нужна и можно применить метод абсорбционной ячейки. В этом случае на входе спектрографа устанавливается газонаполненная ячейка, формирующая многочисленные линии спектра сравнения непосредственно на спектре звезды. Использование такой ячейки в комбинации со спектрографом НЭС показало, что становятся доступными точности σV_r около 20 м/с, а кросс-корреляционный метод обработки сигнала позволяет исследовать относительно слабые объекты [34].

6. ЛУЧЕВЫЕ СКОРОСТИ И ПРОБЛЕМА УНИВЕРСАЛЬНОГО СПЕКТРОГРАФА

Статистика использования звездных спектрографов БТА в течение первых 30 лет показала,

что 6-метровый телескоп остается единственным крупным многопрограммным инструментом, ориентированным на удовлетворение запросов различных групп российских астрономов [21, 35]. Два поколения спектральной аппаратуры создавались астрономами, работающими на БТА, с учетом именно многопрограммного статуса телескопа. Требовать от многопрограммных инструментов предельных характеристик в каком-то избранном классе задач не имеет особого смысла.

Конечно, было бы неплохо, если бы в каждом виде спектроскопических наблюдений, на одном и том же спектрографе достигались предельные характеристики. Но история звездной спектроскопии не знает таких примеров, более того, прогресс в одном из типов спектроскопии может сопровождаться потерями в другом. Достаточно напомнить о периоде перехода на более светосильные камеры и замены призмных спектрографов на дифракционные. Тогда утверждалось, что стремление к высокой широкощельности "... привело в последнее время к снижению точности определения лучевых скоростей (и сдвигов линий вообще) и в результате к потере интереса к этой важнейшей для астрономии проблеме. Тому же способствовало и увлечение дифракционными спектрографами..." [36]. Через 30 лет похожая ситуация повторяется — консерватизм спектроскопистов заставляет совершенствовать методы дифракционной спектроскопии, оставляя без должного внимания (в задаче точного измерения доплеровских сдвигов) методы интерференционной спектроскопии, преимущества которой давно известны [37] и предложены оригинальные решения, см., например, [38]. Задача измерения лучевых скоростей с предельной точностью (сегодня это 1–2 м/с) требует или создания узкоспециализированного дифракционного спектрографа [39], или разработки интерференционных узлов, подключаемых к универсальному дифракционному спектрографу [40].

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты 04–02–17564–а и 07–02–00247–а.

Авторы признательны Е. Л. Ченцову за полезные замечания, высказанные при выполнении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. Е. Панчук, А. Н. Алиев, В. Г. Ключкова, М. В. Юшкин, Препринт № 192 (САО РАН, Нижний Архыз, 2004).
2. V. P. Linnik, in *New Techniques in Astronomy*, Ed. by Hector C. Ingrao (Hordon and Breach Science Publishers, NY, London, Paris, 1971), p. 289.

3. О. Н. Гусев, Н. Г. Зандин, М. В. Лобачев, Опτικο-механич. промышл., № 12, 63, (1976).
4. А. С. Васильев, А. М. Евзеров, М. В. Лобачев, И. В. Пейсахсон, Опτικο-механич. промышл., № 2, 31, (1977).
5. А. С. Васильев, Известия Крымской АО **55**, 224 (1976).
6. Ю. В. Глаголевский, Ю. В. Сухарев, Е. Л. Ченцов. Научно-технический отчет САО, №12., (1976).
7. Е. Л. Ченцов, Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (САО РАН, Нижний Архыз, 1980).
8. В. Е. Панчук, М. В. Юшкин, Э. В. Емельянов, Препринт №212, (САО РАН, Нижний Архыз, 2007).
9. В. С. Рылов, Астрофизич. Исслед. (Изв. САО АН СССР) **2**, 121 (1970).
10. А. А. Иванов, В. Е. Панчук, В. С. Шергин, Препринт №155, (САО РАН, Нижний Архыз, 2001).
11. М. В. Якопов, 2006. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (ТРТУ, Таганрог, 2006).
12. Ю. Ф. Антропов, *Новая техника в астрономии*, № 4, 75 (1972).
13. В. Е. Панчук, Препринт №154 (САО РАН, Нижний Архыз, 2001).
14. P. V. Fellgett, *Optica Acta* **2**, 9 (1955).
15. R. F. Griffin, *Astrophys. J* **148**, 465 (1967).
16. R. Griffin and J. E. Gunn, *Astrophys. J* **191**, 545 (1974).
17. A. Baranne, M. Mayor and J. L. Poncet, *Vistas in Astronomy* **23**, 279 (1979).
18. А. А. Токовинин, *Астрон. ж.* **64**, 196 (1987).
19. В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, *Астрофиз. исслед. (Изв. Спец. Астрофиз. Обсерв.)* **33**, 3 (1991).
20. В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, В. П. Рядченко, *Письма в АЖ* **17**, 645 (1991).
21. В. Е. Панчук, В. Г. Клочкова, *САО РАН. 40 лет* (САО РАН, Нижний Архыз, 2006).
22. В. Е. Панчук, В. Г. Клочкова, Г. А. Галазутдинов, В. П. Рядченко, Е. Л. Ченцов, *Письма в АЖ* **19**, 1061 (1993).
23. В. Е. Панчук, В. Г. Клочкова, И. Д. Найденев, Препринт № 135, (Нижний Архыз, САО РАН, 1999).
24. V. E. Panchuk, J. D. Najdenov, V. G. Klochkova et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 127 (1998).
25. В. Е. Панчук, В. Г. Клочкова, М. В. Юшкин, и др., Препринт № 159, (САО РАН, Нижний Архыз, 2001).
26. Е. Л. Ченцов, Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (САО, Нижний Архыз, 2004).
27. В. Г. Клочкова, С. В. Ермаков, В. Е. Панчук и др., Препринт № 137 (САО РАН, Нижний Архыз, 1999).
28. В. Е. Панчук, Н. Е. Пискунов, В. Г. Клочкова и др., Препринт № 169 (САО РАН, Нижний Архыз, 2002).
29. A. P. Hatzes, W. D. Cochran in *High Resolution Spectroscopy with the VLT*, Ed. M.-H. Ulrich, (ESO Conf. and Workshop Proc. №4, 1992), p. 275.
30. T. M. Brown, R. W. Noyes, P. Nisenson et al., *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **126**, 1285 (1994).
31. J. Ge, J. R. P. Angel, B. Jacobsen et al., *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **114**, 879 (2002).
32. В. Е. Панчук, М. В. Юшкин, И. Д. Найденев, Препринт № 179 (САО РАН, Нижний Архыз, 2003).
33. А. Н. Алиев, В. Е. Панчук, М. В. Юшкин, Препринт № 205 (САО РАН, Нижний Архыз, 2005).
34. В. Е. Панчук, Д. С. Насонов, М. В. Юшкин, Препринт № 216 (САО РАН, Нижний Архыз, 2007).
35. V. E. Panchuk, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 65 (1998).
36. Г. А. Шайн, О. А. Мельников, *Курс астрофизики и звездной астрономии Т.1*, ред. А. А. Михайлов (Наука, Москва, 1973), с. 364.
37. P. Jacquinet, *Journal of the Optical Society of America* **44**, 761 (1954).
38. P. Connes, *Astrophys. and Space Sci.* **212**, 357 (1994).
39. F. Pepe, F. Mayor, B. Delabre et al., *SPIE Proc.* **4008**, 582 (2000).
40. В. Е. Панчук, В. Г. Клочкова, М. В. Юшкин, в сборнике *Методы спектроскопии в современной астрофизике* (труды конференции; 13–15 сентября, ИНАСАН, 2006 г.), ред. Л. И. Машонкина и М. Е. Сачков (Янус-К, Москва, 2007), с. 166.

RADIAL-VELOCITY MEASUREMENTS WITH STELLAR SPECTROGRAPHS OF THE 6-M TELESCOPE

V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, D. S. Nasonov

Solutions are considered that allow the accuracy of stellar radial velocity measurements with the spectroscopic instruments of the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences to be improved. The factors that limit the accuracy of spectroscopic V_r measurements are analyzed both in general and for the particular design of the telescope and its housing.