УДК 520.535

К задаче доплеровского поиска экзопланет

В.Е. Панчук[1,2], А.Н. Алиев[2]

[1] Специальная астрофизическая обсерватория РАН, п.Нижний Архыз, 369167, Россия
[2] Ставропольский государственный университет

Аннотация. Перечислены основные источники и пути снижения ошибок измерения лучевых скоростей звезд. Рассматривается метод измерения лучевых скоростей, основанный на применении интерферометра Фабри–Перо в сочетании с многоканальным спектрографом высокого разрешения.

On the problem of Doppler search for exoplanet

V.E.Panchuk[1,2], A.N.Aliev[2]

[1] Special Astrophysical Observatory of the Russian AS, Nizhnij Arkhyz, 369167, Russia
[2] Stavropol State University, Russia

Abstract. Main sources of measurement errors of radial velocities of stars and methods of their lowering (reduction) are enumerated. A method of radial velocity measurements based on using the Fabry-Perot interferometer coupled with a multichannel high-resolution spectrograph is considered.

1 Введение

Проблема точных измерений лучевых скоростей с целью поиска планетных систем путем измерения доплеровских смещений барицентра “звезда-планета” обсуждается и разрабатывается более 30 лет (Ховард, 1972; Хуанг, 1973; Дрэвиньш, 1975; Серковски, 1976; Кэмпбэлл и Уокер, 1979; Кохран и Хатцес, 1988; Марси и Батлер, 1992), а в конце XX века с помощью этого метода обнаружены десятки планетных систем. Новейшая история поиска внесолнечных планет дана в работах Ксанфомалити (1999, 2000, 2001). Требуемая точность измерения лучевых скоростей (3–6 м/сек) является недостижимой для большинства современных звездных спектрографов, включая и большинство проектируемых. В данной работе перечислим эффекты, затрудняющие достижение указанной точности, и укажем методы измерения лучевых скоростей, используемые при поисках экзопланет. Затем рассмотрим метод, устраняющий основные недостатки известных. Обзор известных нам методов доплеровских измерений лучевых скоростей и достигнутых точностей дан в работе Панчука и др. (2003a).

2 Источники ошибок определения $\mathbf{V_r}$

Основные источники ошибок измерения лучевых скоростей следующие:

1. Неоднородность освещенности входной щели. Приводит к смещениям центров тяжести монохроматических изображений щели, причем эти смещения изменяются от экспозиции к экспозиции. Атмосферная дисперсия проявляется в относительных смещениях монохроматических изображений звезды на щели, что вызывает относительные смещения спектральных линий, находящихся в разных диапазонах длин волн.

2. Нестабильность оптико-механической конструкции спектрографа. Исключая явные конструктивные просчеты (см., например, Гриффин, 1978), можно утверждать, что главным источником нестабильности являются температурные изменения постоянной дифракционной решетки (Панчук и др., 2003a). Кроме этого, изменения температуры, давления и влажности влияют на величину коэффициента преломления воздуха, вызывая смещение спектральных линий.

3. Нестабильность светоприемника. Переход от вакуумных приборов к полупроводниковым не оправдал полностью надежды на увеличение точности позиционных измерений за счет “твердотельности” светоприемника. У матриц приборов с зарядовой связью обнаружены признаки нежесткости модуля светоприемника (Клочкова и др., 1999).

4. Неидентичность заполнения оптики спектрографа излучением исследуемой звезды и спектра сравнения. Исследуемый и реперный спектры формируются с неодинаковым вкладом от различных зон оптики спектрографа, что в сочетании с аберрациями приводит к рассогласованию шкалы длин волн (Талл, 1969).

5. Неодновременность регистрации исследуемого спектра и спектра калибровки и неточность определения центра тяжести экспозиции. Первая причина усиливает проявление нестабильностей спектрографа, вторая приводит к ошибкам, связанным с вычислением топоцентрических поправок на момент центра тяжести экспозиции, выполненной при переменных условиях (т.е. при вариациях качества изображений и прозрачности в течение экспозиции).

6. Наличие геометрических искажений в изображении спектра. Применение полеспрямляющих линз, использование призм в качестве элементов скрещенной дисперсии, наличие

дисторсии, или в целом изменение вида точечных диаграмм по полю камеры спектрографа, все это затрудняет измерение лучевой скорости методами (в основном кросс-корреляционными), использующими сдвиг всех элементов спектра.

7. "Неравноправность" различных участков спектра. Сочетание переменной плотности распределения абсорбций по длинам волн и различной интенсивности различных участков спектра (вследствие изменения концентрации энергии вдоль эшелле-порядка и виньетирования по полю камеры) делает процедуру кросс-корреляционного измерения лучевой скорости неоднозначной. Кроме того, вызванная изменением лучевой скорости величина линейного смещения спектра, постоянная от порядка к порядку эшелле-спектра, не является постоянной в пределах данного порядка. Это снижает чувствительность кросс-корреляционных методов. В красном диапазоне дополнительные помехи создают линии теллурического спектра, имеющие другое значение лучевой скорости.

8. Недостатки системы обработки спектров. Переход от номера канала к длине волны осуществляется при помощи дисперсионной кривой, построенной по спектру сравнения. Точность такого перехода зависит от точности измерения положений реперных линий и от точности аппроксимации дисперсионной кривой полиномом. Спектр сравнения и спектр звезды имеют неодинаковую освещенность вдоль монохроматического изображения щели и (или) регистрируются различными элементами светоприемника. Это приводит к дополнительным ошибкам, вносимым на этапе извлечения одномерных векторов ("отсчет в канале – номер канала") из двумерного изображения, зарегистрированного на матрице ПЗС. Недостатки алгоритмов очистки изображения от следов космических частиц затрудняют применение кросс-корреляционных методов при слабом сигнале.

9. При измерении лучевых скоростей следует стремиться к переоценке линий спектра звезды, т.е. к ситуации, когда ширина элемента разрешения в спектре меньше доплеровской полуширины. В этом случае ошибка измерения сдвига линии пропорциональна ширине инструментального контура в степени 3/2 (Густафссон, 1992). Полная ширина на половине интенсивности (FWHM) слабой линии в спектре Солнца составляет около 0.07A на 4500A, т.е. область экономичных измерений лучевых скоростей у звезд солнечного типа начинается с величины спектрального разрешения R=150000. На крупных телескопах достижение таких значений R связано с ощутимыми потерями света на входе спектрографа (или с потерями в числе одновременно регистрируемых элементов спектра, если для экономии света используются резатели изображения), на средних телескопах наблюдения с такой величиной R требуют длительных экспозиций. Если диаметр изображения звезды близок к ширине щели (ситуация, типичная для малых и средних телескопов), то добавляется ошибка, связанная с центрированием изображения звезды на щели и особенностями гидирования (см.п.1). Таким образом, требование переоценки линий является фундаментальной причиной ошибок, связанных с нестабильностями оптико-механических условий в течение экспозиции.

10. Шумы светоприемника и системы регистрации. Идеальной является ситуация, когда точность определения лучевой скорости ограничена шумами светоприемника. Это означает, что влияние других систематических и случайных факторов снижено или исключено. Подобные системы измерения лучевых скоростей еще не созданы.

Точности, определяемые вышеперечисленными факторами, зависят и от конкретного аппаратурно-методического решения. Далее ограничимся лишь перечислением методов, снижающих или устраняющих влияние этих факторов.

3 Способы снижения ошибок V_r

Влияние неоднородности освещенности входной щели значительно снижается за счет оптоволоконного соединения телескопа и спектрографа и практически устраняется применением оптоволокна с перемешивателем апертур (Хикокс, 1988). Роль нестабильностей оптико-механической конструкции и вариаций показателя преломления воздуха понижается путем размещения спектрографа в термостатируемом объеме постоянного (низкого) давления (Бучи и др., 1999, Пепе и др., 2000). Для снижения роли нестабильностей модуля светоприемника пока можно предложить только частую калибровку. Неидентичность заполнения оптики спектрографа преодолевается либо в оптоволоконных схемах, либо применением абсорбционной ячейки, устанавливаемой на входе спектрографа, в последнем случае исследуемый и реперный спектры формируются в равных условиях (и одновременно). Одновременное впечатывание спектра сравнения осуществляется и в двухволоконных схемах. Для определения центра тяжести экспозиции используется отдельный экспонометрический канал. Хуже обстоит дело с понижением влияния геометрических факторов (пункты 6–8 в предыдущем разделе). Увеличение формата матриц ПЗС требует создания камер с большим неискаженным полем. Роль неодинаковости линейного сдвига вдоль порядка можно снизить, применяя эшелле с меньшим числом штрихов на мм, т.е. укорачивая длину порядка, но принципиальное ограничение остается. В основном выделяются две группы технических решений (оптоволоконные спектрографы и спектрографы с абсорбционными ячейками), объединенные разновидностями кросс-корреляционного метода сравнения спектров. Оптоволоконные методы используются преимущественно на телескопах диаметром 1–2 м (исключение составляет HARPS (Пепе и др., 2000), работающий с зеркалом 3.6 м). На крупных телескопах, где эффективность оптоволоконного сочетания ниже, используются абсорбционные ячейки. Основным прибором 6-метрового телескопа БТА, наиболее пригодным для точных определений лучевых скоростей, является кварцевый эшелле-спектрограф НЭС (Панчук и др., 1999), стационарно размещенный в фокусе Нэсмита и оснащенный крупноформатной матрицей ПЗС (Панчук и др., 2002а). С использованием резателя изображения максимальное спектральное разрешение составляет R=75000 (Панчук и др., 2003б). Для задачи точного определения лучевых скоростей прибор оснащен абсорбционной йодной ячейкой (Панчук и др., 1998) и локальным корректором положения изображения звезды (Иванов и др., 2001).

4 Описание метода

Общим для перечисленных методов является измерение положения (или относительного смещения) спектра. Известно, что измерение положений отдельных линий с требуемой точностью проигрывает по экономичности (т.е. по затратам наблюдательного времени) процедуре измерения смещения спектра как целого (Фелгетт, 1953). С другой стороны, измерение положений линий является менее экономичной процедурой, чем измерение их интегральных интенсивностей или даже профилей (Густафссон, 1992). Поэтому перспективным может оказаться метод, сохраняющий признаки интегрального подхода к спектру (как, например, кросс-корреляционные методы), но свободный от измерения смещений спектральных деталей. В этом случае роль нестабильностей дифракционного спектрографа, особенностей калибровки и обработки спектров может быть существенно снижена или принципиально устранена. В рассматриваемом методе развивается идея регистрации спектра с интерферометрическим разрешением, изложенная в работе Серковски (1978). В качестве основного диспергирующего элемента мы используем интерферометр Фабри–Перо (ИФП), существенно превосходящий дифракционную решетку по величине произведения "разрешение на пропускание" — $R \times L$ (Жакино, 1954). Дифракционный спектрограф НЭС используется в качестве вспомогательного прибора с ИФП на внешней установке (Панчук, 2000). Наличие матрицы ПЗС позволяет одновременно регистрировать несколько сотен спектральных порядков ИФП, т.е. многоканальный спектрограф является средством пространственного разведения порядков ИФП. Участки спектра, пропускаемые ИФП, определяются характеристиками интерферометра, а дифракционный спектрограф служит только для измерения интенсивностей, пропускаемых в данных участках. Всю совокупность регистрируемых порядков ИФП разделим на три группы: порядки, попадающие на коротковолновые "синие" крылья линий (группа b); порядки, попадающие на длинноволновые "красные" крылья линий (группа r); и все остальные, "нерабочие" порядки, попадающие либо на область континуума, либо точно на ядра абсорбций, либо на участки теллурического спектра, показывающие другое значение лучевой скорости, либо на участки, искаженные стабильно локализованными "косметическими" дефектами матрицы ПЗС. Просуммируем интенсивности I, регистрируемые при данном i-том состоянии ИФП в порядках b и r групп, и вычислим отношение сумм $Di = \Sigma I_b / \Sigma I_r$. Так как число порядков велико, эта величина близка к единице. Разделение порядков на группы должно быть выполнено так, чтобы при их небольшом сдвиге в коротковолновую область спектра, соответствующем изменению скорости, например, на –1 км/сек, все отобранные порядки сохранили свою принадлежность к группам. Для смены состояния ИФП, заключенного в объем постоянного давления, мы используем наклон пластин (на угол ϕ) относительно нормального падения лучей. Для состояния j, соответствующего указанному сдвигу, вычислим отношение сумм интенсивностей D_j. Все интенсивности, зарегистрированные в порядках группы b, увеличатся, а в порядках группы r уменьшатся, поэтому $D_j > D_i$. Таким образом, по двум экспозициям, выполненным непосредственно одна за другой, получаем калибровку $D(\phi)$, по которой для $D = 1$ вычисляем угол ϕ_1, соответствующий равенству потоков, регистрируемых в коротковолновом и длинноволновом крыле обобщенной спектральной линии. Значение этого угла приписываем моменту времени между двумя экспозициями, составляющими первое наблюдение. Выполним второе наблюдение данной звезды (аналогичную пару экспозиций) в другой момент времени, предварительно изменив угол наклона ИФП так, чтобы при первой экспозиции второго наблюдения положения порядков ИФП были приблизительно на тех же участках профилей линий, что и при первой экспозиции первого наблюдения. Величину изменения угла вычисляем по разности топоцентрических поправок лучевой скорости между первым и вторым наблюдениями. В этом случае принадлежность порядков к группам сохраняется. Затем выполним вторую экспозицию, изменив наклон ИФП на величину, соответствующую сдвигу системы порядков на –1 км/сек. Таким образом, получаем калибровку $D(\phi)$ для второго наблюдения, которую используем для определения угла ϕ_2, соответствующего условию $D = 1$ для второго наблюдения. Различие между углами ϕ_1 и ϕ_2 вызвано изменением лучевой скорости звезды между первым и вторым наблюдением. В итоге задача определения изменения лучевой скорости сводится к задаче измерения интенсивностей в порядках ИФП и измерения угла наклона ИФП. Задача определения нуль-пункта лучевой скорости сводится к задаче калибровки ИФП при помощи реперного источника, например лампы с полым катодом. При этом, не изменяя наклона ИФП, следует измерить координаты системы колец, образованных несколькими эмиссионными линиями (Панчук, 2000).

5 Обсуждение результатов

5.1 Преимущества рассмотренного метода

Во-первых, задача поддержания стабильных условий в дифракционном спектрографе (длиной 6 м в случае НЭС) и модуле светоприемника заменяется задачей стабилизации ИФП, объемом в несколько см^3. Таким образом, из перечня причин ошибок определения лучевых скоростей исключены пп. 2 и 3. Во-вторых, применение ИФП позволяет раскрывать входную щель спектрографа до тех пор, пока изображения отдельных порядков на светоприемнике еще разделяются (эта процедура не влияет на спектральное разрешение, определяемое параметрами ИФП). Потери света на щели снижаются, а неоднородность освещенности щели (п. 1) при этом возрастает, но этот эффект несуществен, т.к. мы измеряем интегральные интенсивности, пропущенные в порядках, а не положения порядков. В-третьих, в предлагаемом методе роль реперов выполняют участки спектра, пропущенные через ИФП, поэтому эффекты, связанные с неидентичностью заполнения оптики исследуемым и реперным излучением (п. 4), а также с неодновременностью регистрации исследуемого и реперного спектров (п. 5), устраняются. В-четвертых, наличие геометрических искажений эшелле-изображения (п. 6) также несущественно при измерении интенсивностей. "Неравноправность" различных участков спектра (п. 7), определяемая конструктивными особенностями спектрографа, может быть скомпенсирована использованием весовых коэффициентов при суммировании интенсивностей, пропущенных в разных порядках ИФП. Недостатки системы обработки, связанные с алгоритмами позиционирования координатных масок и неточностями аппроксимации дисперсионной кривой (п. 8), могут быть устранены за счет использования специальной системы обработки, нечувствительной к ошибкам позиционирования.

Итак, основные источники ошибок определения лучевых скоростей, свойственные традиционным методам, устраняются, или их влияние существенно ослаблено. Ошибки, связанные с неидентичностью экспозиций в целом, т.е. по всем порядкам, в основном устраняются, т.к. мы используем отношения сумм интенсивностей, вычисленные для каждой экспозиции. Остается ошибка определения сумм интенсивностей, связанная с влиянием атмосферной экстинкции. Последняя различна для различных экспозиций и, следовательно, интенсивности, пропущенные в различных порядках эшелле-спектра, войдут в указанные суммы с разным весом, зависящим от зенитного расстояния. Зная закон изменения экстинкции для места наблюдений, соответствующие поправки можно вычислить. Источником ошибок калибровки ИФП является неидентичность засветки интерферометра светом лампы спектра сравнения и светом звезды.

5.2 Оценка параметров метода

Наиболее информативными являются участки с максимальными градиентами интенсивности (т.е. участки, содержащие крылья неблендированных линий). Плотность таких участков можно рассчитать для каждого спектрального интервала по спектральному атласу, либо по синтетическому спектру, вычисленному по модели атмосферы. Оценку можно сделать и с помощью функций вероятности распределения непрозрачности (OPDF), используемых при расчете моделей атмосфер. Функцию OPDF можно вычислить и без детальных расчетов "от линии к линии", оценивая число сильных линий в данном интервале и форму контура одиночной линии (Панчук, 1978). Для звезд солнечного типа ($[Fe/H]=0$) наиболее информативным, т.е. имеющим максимальное число участков с большими градиентами интенсивности, является диапазон 4000–5300 Å. В области $\lambda > 5500$ Å плотность линий уменьшается, в области $\lambda < 4000$ Å блендирование возрастает настолько, что число участков с максимальным градиентом интенсивности уменьшается, кроме того, и поток от звезд спектрального класса F и G, и чувствительность приемника здесь ниже. Приводимые далее оценки сделаны для длины волны 4500 Å.

Для уменьшения потерь света на входной щели мы применяем резатели изображения (Панчук и др., 2003б). В частности, в данном методе использован резатель на 3 среза, каждый шириной 0.6 мм, при этом полностью используется изображение звезды диаметром 1.8 мм или 1.8 угл. сек. Фактор широкощельности НЭС равен 12, т.е. входной щели шириной 0.6 мм соответствует ее проекция шириной 50 мкм, что составляет 3.3 пикселя шириной по 15 мкм. Толщина разделительного кольца ИФП $d = 5$ мм, что на длине волны 4500.045 Å соответствует порядку $k = 22222$ и расстоянию между центрами соседних порядков $\delta\lambda = 0.2025$ Å, т.е. 7.5 pix. Таким образом обеспечивается выделение отдельных порядков аппаратной функции ИФП из каждого порядка эшелле-спектра. Фокусное расстояние линзы, формирующей изображения колец на входе эшелле-спектрографа, $F = 840$ мм, радиус первого интерференционного кольца $r_1 = 8$ мм, т.е. при диаметре входной диафрагмы 1.8 мм ИФП работает в центральном пятне. Пусть фактор добротности ИФП составляет 10, тогда ширина аппаратной функции ИФП равна 0.02A, т.е. условие переоценки спектральной линии выполняется ($R = 225000$). Изображение одного среза проецируется на площадку размером 3.3×10 пикселей, так что при шуме считывания $7.7e^-$ вклад в шум от трех срезов составит $77e^-$. Уровень сигнала оценим, используя результаты работы Панчука и др. (2002). При пропускании системы телескоп+спектрограф 0.01, квантовой эффективности светоприемника 0.83 в полосе шириной 0.02 Å за 15-минутную экспозицию от звезды 5-й величины соберем 500000 фотоэлектронов, а от звезды 8-й величины – 31543 фотоэлектронов (т.е. $S/N = 400$). Необходимая фотометрическая точность измерения интенсивностей в крыле линии пропорциональна градиенту интенсивности в крыле линии, длине волны, точности определения лучевой скорости и обратно пропорциональна скорости света. По атласу спектра Солнца (Куруц и др., 1984), полученному с разрешением $R = 300000 - 500000$, оценили среднее значение градиента, в долях континуума оно составляет 4 на 1 Å (подсчеты при спектральном разрешении $R = 65000$ дают 2.28 на 1 Å (Мерлин, 1985)). Для спектрального разрешения $R = 225000$ примем среднее значение градиента интенсивности 3. Если в результате измерения по двум точкам на крыле линии требуется получить точность 2 м/сек, то фотометрическая точность измерения интенсивностей соответствует накопленному сигналу $S/N = 11764$. Для того, чтобы эту величину снизить до $S/N = 400$, следует выполнить измерения в 864 точках спектра. За одну экспозицию на НЭС можно зарегистрировать диапазон 4000–5500 ÅÅ. Число линий, пригодных для измерения, мы оценили по атласу спектра Солнца (Куруц и др., 1984). В диапазоне 4000–5500 оказалось 3615 линий с остаточной интенсивностью $I/Ic < 0.95$. В приближении равномерного распределения линий и порядков ИФП в указанном диапазоне получим плотность 2.4 линии на 1A, а плотность порядков ИФП составляет 5 на 1A. Это означает, что каждый второй пик аппаратной функции ИФП несет информацию о градиенте в крыле спектральной линии. В диапазон 4000-5500 ÅÅ попадает 6819 порядков ИФП с номерами $k = 25000 - 18181$, более 3000 из них попадает на участки доплеровских ядер, т.е. в группах b и r окажется по 1500 пиков — полезных каналов измерения. Приходим к выводу, что в случае спектров с узкими линиями метод пригоден для звезд солнечного типа с $m_v < 8$.

5.3 Калибровка состояния ИФП

Вместо резателя изображений устанавливается длинная щель и регистрируется эмиссионный спектр сравнения. Измеряются радиусы интерференционных колец. Например, на длине волны 4500.045 на оси эшелле-порядка наблюдается порядок ИФП $k = 22222$, радиус кольца порядка $k = 22221$ $r_1 = 7.96898$ мм, $k = 22220$ $r_2 = 11.2698$ мм, $k = 22219$ $r_3 = 13.8027$ мм, $k = 22218$ $r_4 = 15.93796$ мм. При добротности ИФП, равной 10, ширины изображений колец на щели составят 0.330, 0.253 и 0.213 мм, что при факторе широкощельности 12 дает ширины изображений колец на ПЗС 1.8, 1.4 и 1.2 пикселя соответственно. При точности определения положения пика интенсивности фотометрического сечения кольца в 0.1 pix точность определения радиуса кольца составит 0.018 мм, что соответствует точности определения разности хода 0.0009 мм, или точности определения угла наклона ИФП 0.7675°, или точности определения длины волны 0.001296 Å, или точности определения скорости 86.4 м/сек. Измеряя для каждой из сотен эмиссионных линий по 3–4 интерференционных кольца, точность калибровки состояния ИФП можно довести до 3–4 м/сек.

5.4 Настройка ИФП

Разбиение совокупности порядков ИФП на группы b и r можно выполнить по спектру излучения Солнца, рассеянного в дневной атмосфере. В этом случае суммы потоков, измеренных в порядках обеих групп, соответствуют нулевой скорости объекта относительно наблюдателя. При настройке ИФП на исследуемую звезду необходимо предвычислить ее топоцентрическую лучевую скорость на момент наблюдения и установить угол наклона ИФП так, чтобы положения порядков приблизительно совпадали с положениями, установленными по солнечному спектру. Если топоцентрическая скорость звезды отрицательна, то длины волн порядков ИФП могут быть уменьшены путем наклона ИФП на угол ϕ, где $cos\phi = 1 + v/c$. Пример: скорость звезды $v = -30$ км/сек, $\phi = 0.81°$. Если скорость положительна — схему разбиения порядков на группы следует изменить, уменьшив номера всех порядков на целое от частного $v/FSR + 1$ (здесь свободный спектральный интервал FSR выражен в единицах v), с последующей подстройкой положения порядков путем наклона ИФП. Пример: 0.2 Å соответствуют 13.33 км/сек на 4500 Å. Скорость звезды +30 км/сек, 30/13.33 = 2.25. Порядок $k = 22222$ (4500.045) заменим порядком $k = 22219$ (4500.652), что соответствует перенастройке групп на разность скоростей 40.6 км/сек, а затем наклоном ИФП на 0.48° сдвинем порядки на 10.6 км/сек (0.159 Å) в коротковолновую область.

6 Выводы

Рассмотренный метод имеет много общего с кросс-корреляционным методом измерения лучевых скоростей при помощи одноканального светоприемника (Фелгетт, 1953; Гриффин, 1967; Баранн и др., 1979). Набор пиков аппаратной функции ИФП можно рассматривать как маску, окна которой не центрированы на линии, а случайным образом регистрируют участки профилей линий. Применение многоканального приемника позволяет “управлять” маской и после того, как измерения выполнены, т.е. мы можем группировать избранные каналы и игнорировать “каналы помех”. Так как смещение каналов ИФП с длиной волны подчиняется такому же закону, что и смещение спектральных линий, устраняется эффект неравноправности краев спектрального порядка (Баранн и др., 1979), ограничивающий точность кросс-корреляционного метода. Отличие нового метода в том, что он свободен от влияния нестабильностей дифракционного спектрографа и светоприемника. Важным моментом является также переход на компактный спектральный прибор с принципиально иным соотношением R × L, это дает преимущества при наблюдениях на больших телескопах.

Не исключено, что метод управляемой маски позволит решать и другие задачи. Например, задача измерения дифференциальных сдвигов линий, формирующихся на различных глубинах в атмосфере, может быть решена путем группирования порядков ИФП, попадающих на линии различной интенсивности. Из подобных наблюдений может быть извлечена информация об асимметрии линий, или о различной величине зеемановского уширения. В целом, метод представляется перспективным во всех случаях, когда обеспечение стабильности частот измеряемых каналов важнее, чем обеспечение максимального числа одновременно передаваемых элементов спектра.

7 Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 04–02–17564).

Список литературы

Баранн и др. (Baranne A., Mayor M., Poncet J.L.), 1979, Vistas in Astronomy, **23**, 279

Бучи и др. (Bouchy F., P.Connes, Bertaux J.L.), 1998, In "Precise Stellar Radial Velocities" IAU Coll. №170, eds. J.B.Hearnshaw and C.D.Scarfe, ASP Conf. Ser. 1999, **185**, 22

Гриффин (Griffin R.F.), 1967, Astrophys. J., **148**, 465

Гриффин (Griffin R.F.), 1978, Observatory, **98** №1027, 247

Густафссон (Gustafsson B.), 1992, In "High Resolution Spectroscopy with the VLT", ESO Conference and Workshop Proceedings №40, 17

Дрэвиньш (Dravins D.), 1975, Astron. Astrophys., **43**, 45

Жакино (Jacquinot P.), 1954, J. Opt. Soc. Amer., **44**(10), 761

Иванов А.А., Панчук В.Е., Шергин В.С., 2001, Препринт САО N155

Клочкова В.Г., Ермаков С.В., Панчук В.Е., Таволжанская Н.С., Юшкин М.В., 1999, Препринт САО N137

Кохран и Хатцес (Cohran W.D., Hatzes A.P.), 1988, Proc. SPIE **1318**, 148

Ксанфомалити Л.В., 1999, Астрон. вестн., **33**, N6, 547

Ксанфомалити Л.В., 2000, Астрон. вестн., **34**, N6, 529

Ксанфомалити Л.В., 2001, Астрон. вестн., **35**, N2, 188

Куруц и др. (Kurucz R.L., Furenlid I., Brault J., Testerman L.), Solar Flux Atlas from 296 to 1300 nm. National Solar Observatory Atlas No.1. June 1984. Harvard Univ.

Кэмпбэлл и Уокер (Campbell B., Walker G.A.H.), 1979, Publ. Astr. Soc. Pacific, **91**, 540

Марси и Батлер (Marcy G.W., Butler R.P.), 1992, Publ. Astr. Soc. Pacific, **104**, 270

Мерлин (Merline W.J.), 1985, In Stellar Radial Velocities, IAU Coll. No.88, A.G. Davis Philip ed., p.87

Панчук В.Е., 1978, Сообщения САО, **22**, 5

Панчук В.Е., 2000, Препринт САО N144

Панчук и др. (Panchuk V.E., Yermakov S.V., Bondarenko Yu.N.), 1998, Bull. Spec. Astrophys. Observ., **44**, 132

Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Найденов И.Д., 1999, Препринт САО N135

Панчук В.Е., Пискунов Н.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., Ермаков С.В., 2002а, Препринт САО N169

Панчук В.Е., Ермаков С.В., Клочкова В.Г., 2002б, Препринт САО N172

Панчук В.Е., Алиев А.Н., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., 2003а, Препринт САО N192

Панчук В.Е., Юшкин М.В., Найденов И.Д., 2003б, Препринт САО N179

Пепе и др. (Pepe F., Mayor M., Delabre B., Kohler D., Lacroix D., Queloz D., Udry S., Benz W., Bertaux J.-L., Sivan J.-P.), 2000, Proc. SPIE, **4008**, 582

Серковски (Serkowski K.), 1976, Icarus, **27**, 13

Серковски (Serkowski K.), 1978, In "High Resolution Spectrometry" Proc. of the 4 th International Colloquium on Astrophysics held in Trieste, July 3-7, Ed. M.Hack., 245

Талл (Tull R.G.), 1969, Appl. Opt., **8**, 1635

Фелгетт (Fellgett P.B.), 1953, Optica Acta, **2**, 9

Хикокс (Heacox W.D.), 1988, In "Fiber Optics in Astronomy" ed. S.C.Barden, ASP Conf. Ser., **3**, 205

Ховард (Howard R.), 1972, Solar Phys., **24**, 123

Хуанг (Huang S.-S.), 1973, Icarus, **18**, 339