

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ**

ПРЕПРИНТ 216

В. Е. Панчук, Д. С. Насонов, М. В. Юшкин

**СПЕКТРАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ФОКУСА НЭСМИТ
6-МЕТРОВОГО ТЕЛЕСКОПА БТА. XII. ИЗМЕРЕНИЕ
ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ
АБСОРБЦИОННОЙ ЯЧЕЙКИ**

**Нижний Архыз
2006**

Спектральный комплекс фокуса Нэсмита 6-метрового телескопа БТА. XII. Измерение лучевых скоростей с применением абсорбционной ячейки

В.Е.Панчук¹, Д.С.Насонов², М.В.Юшкин¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167, Россия

²Московский государственный университет

Аннотация. В работе представлен алгоритм кросс-корреляционного анализа звездных спектров, полученных с применением абсорбционной ячейки для задачи высокоточного измерения лучевых скоростей. На примере наблюдательных данных с кварцевого эшелле-спектрографа НЭС, установленного в фокусе Нэсмит 6-метрового телескопа БТА, проведена апробация данного алгоритма, представлены результаты анализа спектров. С использованием полуэмпирического моделирования спектров оценивается точность определения лучевых скоростей методом кросс-корреляционного анализа для разных отношений сигнал/шум.

Введение

Точность измерения доплеровских сдвигов линий в звездных спектрах ΔV_r зависит от множества инструментальных эффектов [1, 2]. Продолжительное время основными факторами, ограничивающими повышение точности измерений ΔV_r , являлись эффекты нежесткости механической конструкции подвесных спектрографов и эффекты тепловой нестабильности стационарных спектрографов. После ряда конструктивных усовершенствований (создание систем механической разгрузки и систем термической стабилизации) на первый план вышли эффект неоднородности освещенности входной щели и эффект неидентичности заполнения оптики спектрографа излучением исследуемой звезды и излучением канала спектра калибровки. Принципиально понизить роль этих эффектов удастся при помощи оптоволоконного сочетания телескопа и спектрографа или оптических приспособлений, вращающих изображение звезды относительно стабилизированного центра тяжести изображения. Однако существует ряд случаев, когда оптоволоконное сочетание представляется проблематичным. Например, на крупных телескопах с большим масштабом изображения невозможно выполнить условие полного использования звездного изображения путем сочетания телескопа и спектрографа высокого разрешения посредством одного оптического волокна. Кроме того, обнаружены эффекты нестабильности собственно модуля охлаждаемого светоприемника [3], которые снижаются при переходе на модуль, где защитное стекло криостата лишено системы принудительного обогрева [4]. Влияние эффектов неоднородности освещенности щели и неидентичности заполнения оптики спектрографа, наряду с эффектами нестабильно-

сти модуля светоприемника, можно существенно понизить, если выполнить условие одновременной регистрации спектра звезды и спектра сравнения, когда в качестве осветителя спектрографа выступает только телескоп.

Метод измерения реперного спектра, зарегистрированного на фоне спектра звезды, предложен задолго до появления оптоволоконных систем. Вначале использовался теллурический спектр [5], затем было предложено устанавливать на входе в спектрограф высокотемпературную абсорбционную ячейку с парами HF [6], позже был найден безопасный низкотемпературный вариант – ячейка с парами йода (I_2) [7]. Во всех случаях регистрация изучаемого и опорного спектра осуществляется одновременно в течение всей экспозиции, поэтому изменение характера заполнения оптики спектрографа и нестабильности положения спектральных линий проявляются на обоих спектрах одинаковым образом.

Аппаратура и эксперимент

Для спектрографов высокого разрешения 6-метрового телескопа БТА изготовлены две абсорбционные ячейки [8]. Первый экземпляр (образца 1995г) снабжен двойными оптическими окнами на входе и на выходе (своеобразные «стеклопакеты», повышающие потери света). В колбе низкого давления помещено небольшое количество кристаллического йода, возгонка которого обеспечивается подогревом ячейки. Стабилизация температуры обогрева обеспечивается с точностью до $0.1^{\circ}C$. Из-за низкой концентрации паров молекулярного йода первая ячейка характеризуется относительно неглубокими линиями, поэтому в настоящее время используется только в лабораторных экспериментах. Второй экземпляр изготовлен с учетом опыта первых наблюдений, и эпизодически используется на БТА с 1998 г. Ячейка установлена в предщелевой части, общей для трех спектрографов высокого разрешения: кварцевого дифракционного спектрографа скрещенной дисперсии – НЭС [9], многомодового дифракционного спектрографа скрещенной дисперсии – Рысь [10], и кварцевого дифракционного спектрографа ОЗСП [11].

Эксперимент выполнен на эшелле-спектрографе с большим диаметром коллимированного пучка – НЭС, оснащенный кварцевой корректирующей оптикой и матрицей ПЗС с числом элементов (пикселей) 2048×2048 [4]. На входе спектрографа использован резатель изображений [12], обеспечивающий спектральное разрешение $R=75000$ при использовании изображения турбулентного диска звезды с угловым диаметром 1.2 секунды. Были выполнены серии экспозиций трех типов: излучения лампы накаливания, пропущенного через йодную ячейку (далее «йод»); излучения Солнца, рассеянного в земной атмосфере в сумерках (далее «звезда»); а также излучения Солнца, рассеянного в земной атмосфере и пропущенного через ячейку (далее «звезда+йод»). Все спектры получены с отношением сигнал/шум (S/N), превышающим несколько сотен.

Обработка наблюдений

Двумерные изображения эшелле-спектров обработаны посредством комплекса программ [13], позволяющим, в частности, учитывать применение резателей изображе-

ний. На рисунках 1а, 1б, и 1в приведены фотометрические разрезы одного и того же спектрального порядка для случая регистрации спектров «йода», «звезды» и «звезда+йод» соответственно.

Основная цель данного эксперимента – построить схему работы с данными наблюдений, пригодную для обработки сильно зашумленных спектров. Поэтому из дальнейших процедур исключены классические этапы обработки спектральных векторов (когда астроном ориентируется по характеру распределения энергии в спектральном порядке и по виду профилей отдельных линий), а именно: определение точек, по которым выполняется проведение непрерывного спектра в каждом порядке, а также все процедуры работы с отдельными линиями (аппроксимация формы линии и определение ее доплеровского сдвига). Корреляционные функции, построенные по данным вида рис.1, будут содержать как пик, соответствующий положению линий, так и широкую подложку, отражающую постоянную составляющую сигнала (т.е. не содержащую абсорбционные спектральные детали), т.е. форму распределения энергии в данном порядке. Поэтому с рисунками типа рис.1 следует выполнить процедуру, подобную классической процедуре приведения к уровню непрерывного спектра, но эта процедура должна быть автоматической. Для получения кривой концентрации энергии в каждом спектральном порядке мы использовали спектр той же лампы накаливания, зарегистрированный без абсорбционной ячейки. Процедура «выравнивания» спектра выполняется для спектров всех типов («звезда», «йод», «звезда+йод»), с одной и той же функцией, отражающей распределение энергии в непрерывном спектре для данного порядка. Пример обработанного спектра «звезды» приведен в нижней части рис.2. Видно, что автоматическая процедура приведения к уровню непрерывного спектра работает с погрешностями (уровень континуума не всюду соответствует единице), но здесь важно, что процедура работает одинаково со спектрами трех типов («звезда», «йод», «звезда+йод»).

С полученными таким образом векторами выполнялись следующие процедуры. Спектр «звезда+йод» рассматриваем как наблюдаемый, а спектры «звезда» и «йод» назовем компонентами полуэмпирической модели. Простейшее полуэмпирическое моделирование спектра состоит в получении из этих компонент (путем перемножения и вычитания единицы) последовательности новых спектров вида «звезда+йод», где спектры «звезда» и «йод» сдвинуты относительно друг друга каждый раз на известную величину – шаг дискретизации спектра, два шага дискретизации и т.д. Такие сдвиги имитируют доплеровский сдвиг спектра звезды относительно системы наблюдателя (ячейка и спектрограф). Каждый из этих модельных спектров затем был коррелирован с наблюдаемым, и по критерию максимального коэффициента корреляции выбирался модельный спектр с оптимальной величиной относительного сдвига спектров «звезда» и «йод». Этот сдвиг и есть искомое доплеровское смещение «звезды» относительно наблюдателя («йод»).

Для вычисления корреляционных функций с относительными сдвигами спектров, соответствующих измерению с точностью около 10м/сек, необходимо увеличить число отсчетов в обрабатываемом спектральном порядке. Каждый спектральный порядок, представляющий собой вектор из отсчетов интенсивности для 2048 пикселей, был преобразован в вектор из 204800 отсчетов. Например, для порядка с центральной длиной волны 5132\AA этот шаг разбиения соответствует изменению

лучевой скорости на 18 м/сек. Процедура разбиения спектра осуществлялась двумя способами. Во-первых, выполнялась интерполяция спектра сплайнами, и с полученной функции были сняты дополнительные отсчеты. Во-вторых, проводилась процедура *rebinning*'а, т.е. расщепления пикселя на равные части. При этой процедуре пиксель делился на 100 частей таким образом, что интенсивность частей изменялась линейно, пропорционально интенсивности соседних пикселей, однако суммарная интенсивность частей пикселя оставалась равной интенсивности изначального пикселя.

Результаты

На рис.3 представлен результат вычисления кросс-корреляционной функции для спектра с отношением сигнал/шум больше 100. Показаны кросс-корреляционные функции, рассчитанные при двух видах разбиения пикселя, при сплайн интерполяции и для линейного *rebinning*'а. Видно, что результат не зависит от способа разбиения элемента пространственного разрешения приемника. Расчет относительного сдвига двух спектров проводился в долях пикселя, затем переводился в длины волн и в лучевые скорости. Для вычисления изменения лучевой скорости на практике более корректно каждый эшелле-порядок переводить в пространство лучевых скоростей относительно центральной длины волны с равномерным шагом по скорости и вычислять кросс-корреляционную функцию в шкале скоростей. Однако такая процедура требует дополнительного переразбиения пикселей с переменным шагом, поскольку в пределах одного порядка диапазон скоростей, приходящихся на единичный элемент приемника, меняется от одного края порядка к другому, но остается постоянным при переходе от порядка к порядку, что следует из свойств эшелле-спектра. Процедура разбиения с переменным шагом приводит к небольшому сглаживанию спектра и уменьшению спектрального разрешения, и, соответственно, к снижению точности метода. Однако вычисление относительного смещения спектров в шкале пространственных координат элементов приемника также снижает точность определения лучевых скоростей, поскольку одному и тому же смещению спектра в шкале лучевых скоростей будет соответствовать различное смещение в шкале и длин волн, и координат элементов приемника на разных краях одного эшелле порядка.

На рис. 4 приведены результаты вычисления кросс-корреляционных функций для низкого отношения сигнал/шум ($S/N=7$). Так же, как и в случае с функцией для спектров с высоким сигнал/шум, расчет производился при двух способах разбиения пространственного элемента разрешения приемника. В данном случае различие двух кросс-корреляционных функций заметно, однако результат определения относительного смещения спектров совпадает, поскольку совпадают максимумы двух функций, а снижается только степень корреляции двух спектров при разных способах разбиения. Линейное разбиение дает лучшую корреляцию по сравнению со сплайн интерполяцией. Видно, что полуширины пиков кросс-корреляционных функций остаются постоянными при значительном изменении отношения сигнал/шум в исследуемом спектре.

На рис.5 приведен итоговый график, содержащий результаты моделирования для различных спектральных порядков и различных отношений сигнал/шум. Видно, что точность ограничивается шагом дискретизации спектра и для больших отношений сигнал/шум точность данного метода равняется шагу разбиения элемента пространственного разрешения приемника.

Выводы

Разработан алгоритм определения относительного изменения лучевых скоростей по спектрам с высоким спектральным разрешением, полученным с использованием абсорбционной ячейки. Данный метод не требует моделирования аппаратной функции спектрографа и учета изменения аппаратной функции по кадру светоприемника, и, следовательно, упрощается анализ спектров. На примере реальных наблюдений на спектрографе НЭС и с использованием полуэмпирического моделирования спектров показано, что метод работает в широком диапазоне отношений сигнал/шум и для хорошо накопленных спектров ограничен выбранным шагом дискретизации исходного спектра. Вычисление кросс-корреляционной функции слабо чувствительно к способу разбиения элемента пространственного разрешения приемника.

Благодарности

Работа поддержана РФФИ (проект 04-02-17564-а).

Литература

1. Панчук В.Е., Алиев А.Н., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., 2003, Препринт САО РАН No.192, с.1-38.
2. Панчук В.Е., Алиев А.Н., 2004, Препринт САО РАН No.204, с.1-9.
3. Клочкова В.Г., Ермаков С.В., Панчук В.Е., Таволжанская Н.С., Юшкин М.В., 1999, Препринт САО РАН No.137, с.1-15.
4. Панчук В.Е., Пискунов Н.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., Ермаков С.В., 2002, Препринт САО РАН No.169, с.1-15.
5. Griffin R., Griffin R., 1973, Mon. Not. Royal Astron. Soc., V.162. P.143.
6. Campbell B., Walker G.A.H., 1979, Publ. Astron. Soc. Pacific, V.91. P.540.
7. Marcy G.W., Butler R.P., 1992, Publ. Astron. Soc. Pacific, V.104. P.270.
8. Panchuk V.E., Yermakov S.V., Bondarenko Yu.N. 1998. Bull. Spec. Astrophys. Observ., V.44, p.132.
9. Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Найденов И.Д., 1999, Препринт САО РАН No.135, с.1-18.
10. Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Найденов И.Д., Витриченко Э.А., Викульев Н.А., Романенко В.П., 1999, Препринт САО РАН No.139, с.1-15.
11. Панчук В.Е., 2001, Препринт САО РАН No.154, с.1-18.
12. Панчук В.Е., Юшкин М.В., Найденов И.Д., 2003, Препринт САО РАН, No.179, с.1-20.
13. Юшкин М.В., Клочкова В.Г., 2005, Комплекс программ обработки эшелле-спектров. Препринт САО РАН No.206, с.1-28.

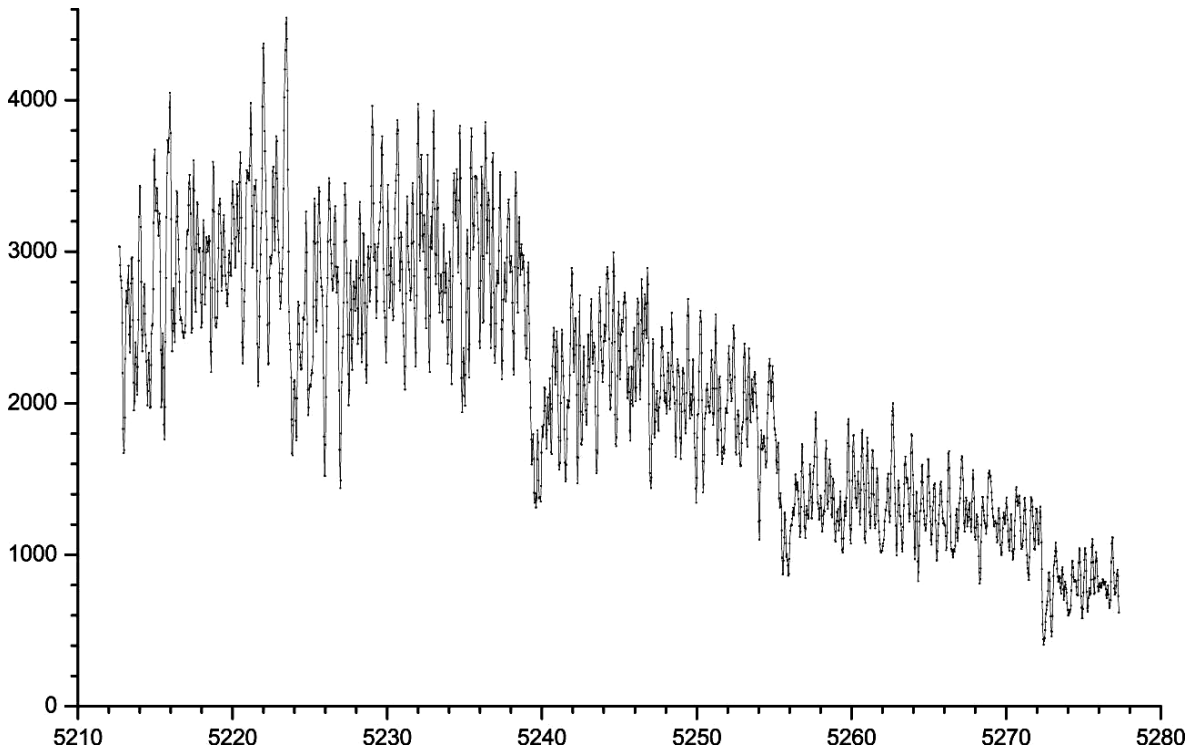


Рис. 1а. Фотометрический разрез спектрального порядка, содержащего молекулярные полосы спектра йода.

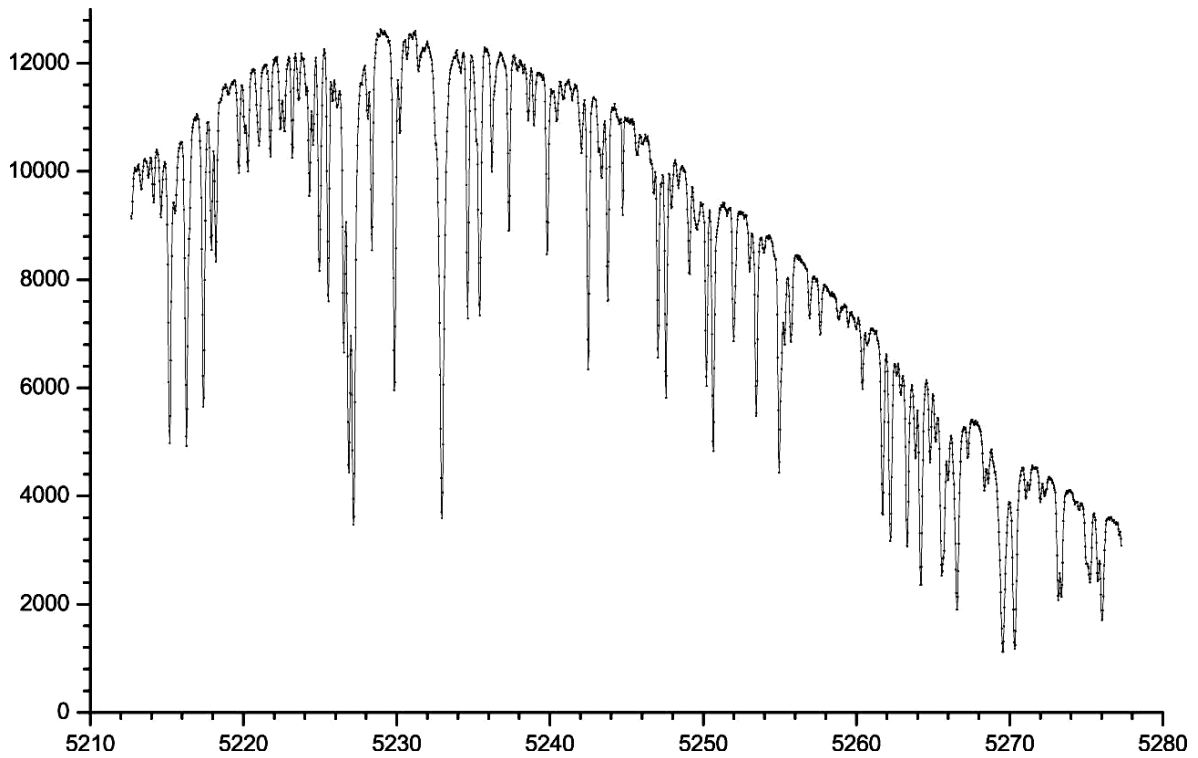


Рис. 1б. Фотометрический разрез спектрального порядка, содержащего абсорбционный спектр звезды.

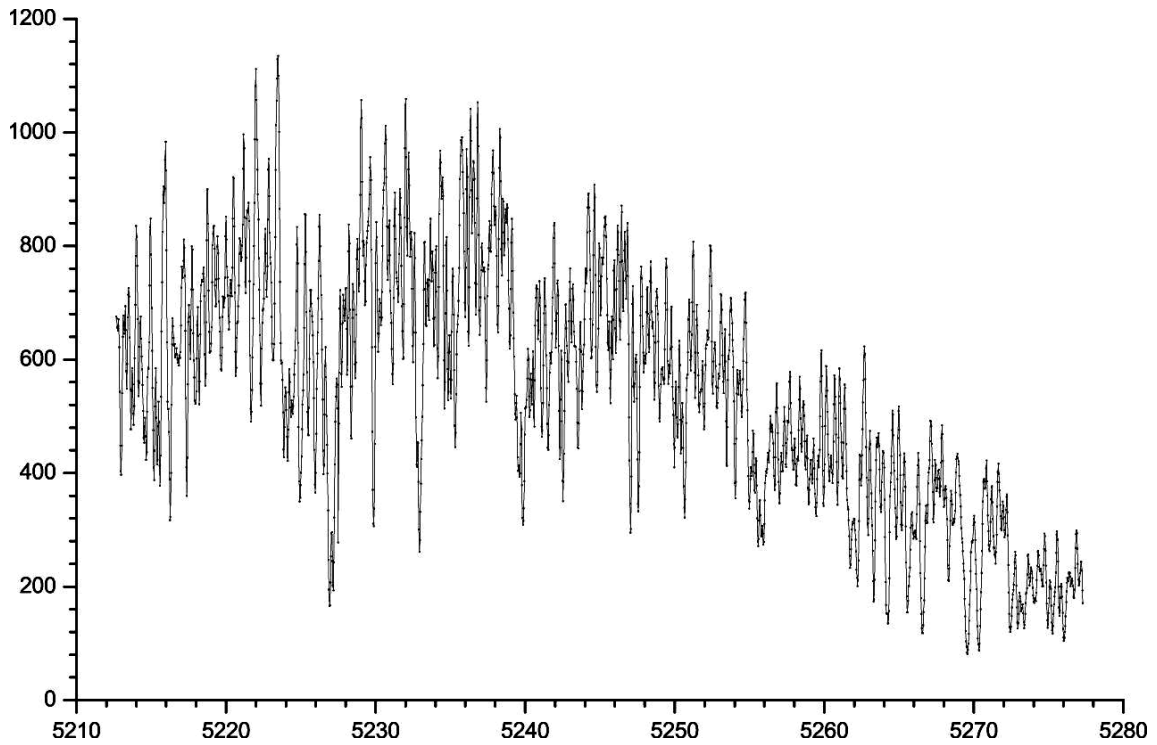


Рис.1в. Фотометрический разрез спектрального порядка, содержащего молекулярные полосы спектра йода и абсорбционный спектр звезды.

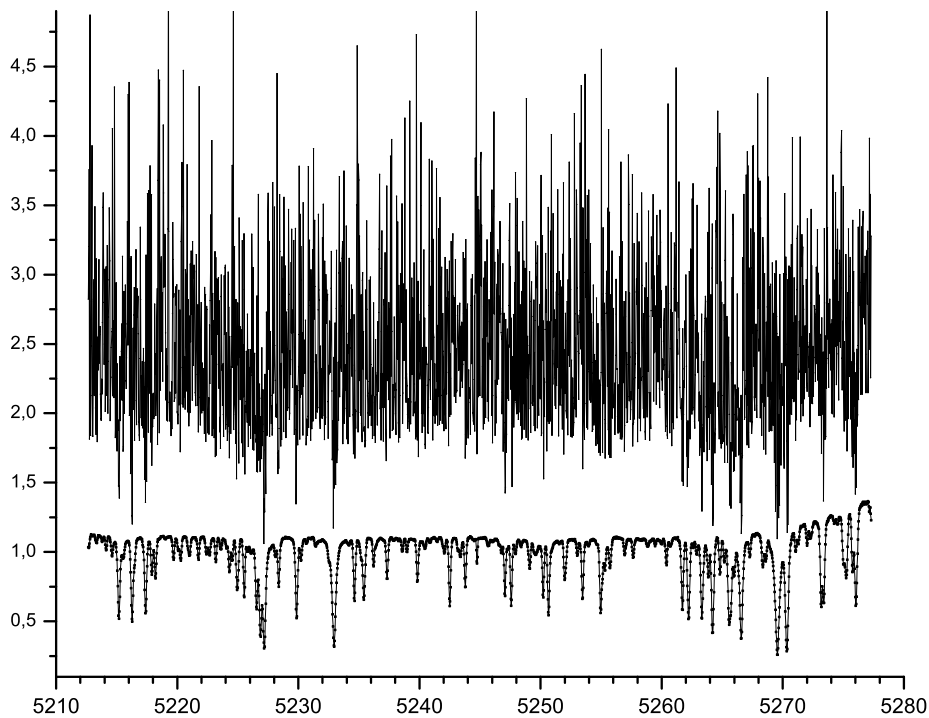


Рис.2. Внизу – разрез одного из порядков спектра звезды, исправленный за кривую концентрации энергии в спектральном порядке. Вверху – то же, но для случая низкого отношения сигнал/шум.

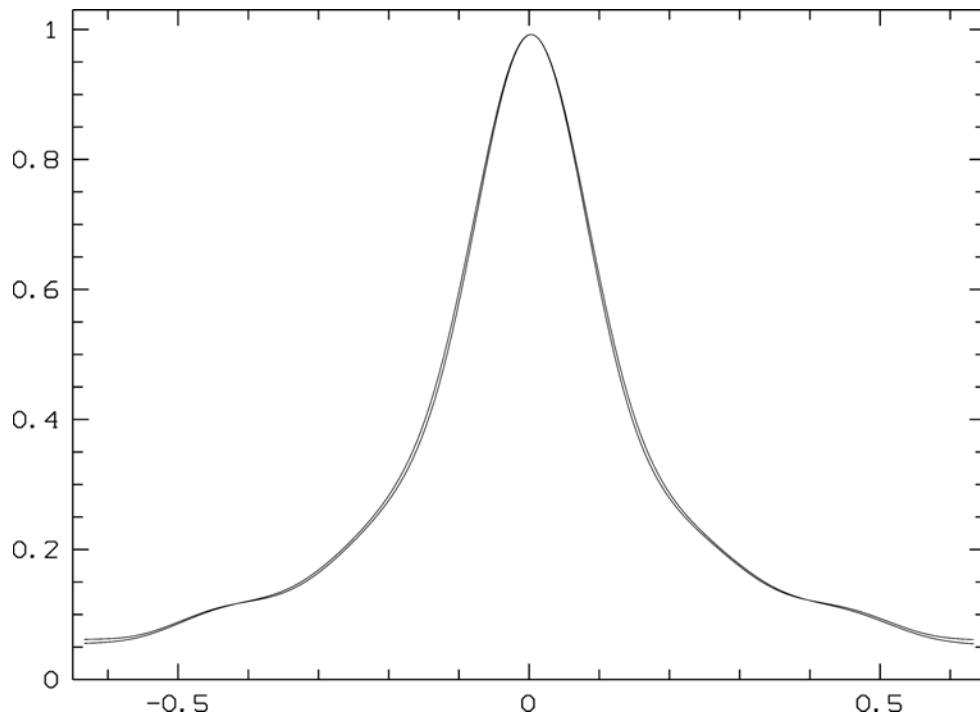


Рис.3. Пример корреляционных функций, рассчитанных для спектров с высоким отношением сигнал/шум.

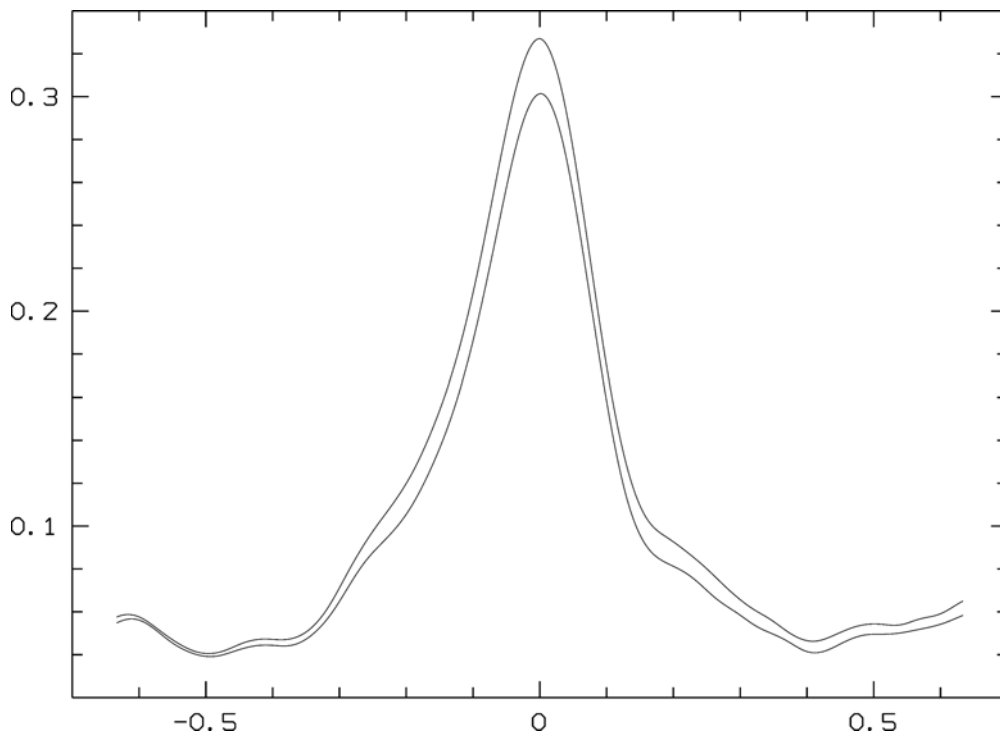


Рис.4. Пример корреляционных функций, рассчитанных для спектров с низким отношением сигнал/шум.

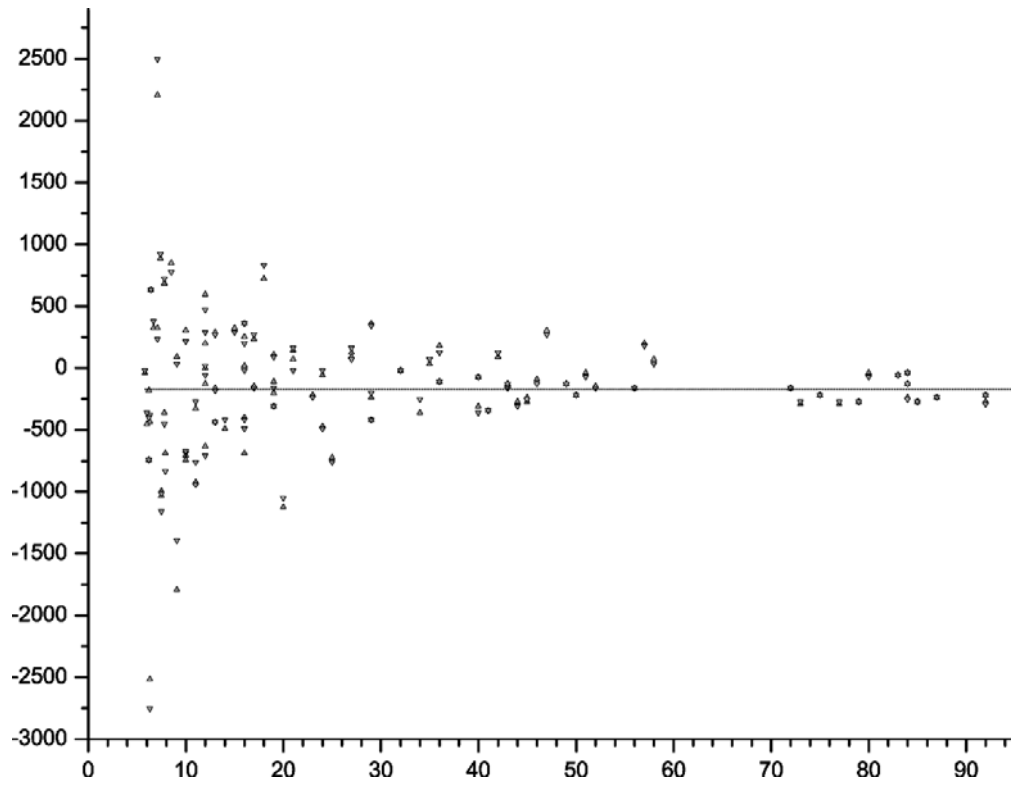


Рис.5. Точность кросс-корреляционного определения доплеровского сдвига (ордината, в м/сек), в зависимости от величины отношения сигнал/шум в спектре (абсцисса).

1. **Спектральный комплекс фокуса Нэсмита 6-метрового телескопа**
2. **БГА. XII. Измерение лучевых скоростей с применением абсорбционной ячейки**

В.Е.Панчук, Д.С.Насонов, М.В.Юшкин

Работа поступила в печать 20 декабря 2006 г.

Специальная астрофизическая обсерватория РАН