

УДК 52-17; 520.84; 004.67

DECH: ПАКЕТ ПРОГРАММ ДЛЯ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА АСТРОНОМИЧЕСКИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ

© 2022 Г. А. Галазутдинов^{1,2*}

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, 298409 Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 27 августа 2022 года; после доработки 28 сентября 2022 года;
принята к публикации 30 сентября 2022 года

В статье дается краткое описание комплекса программ для обработки и анализа астрономических спектров DECH. DECH поддерживает все этапы обработки и анализа спектральных данных, включая предварительную обработку изображений, экстракцию спектров (в том числе с переменным наклоном щели), построение шкалы длин волн двумерным полиномом, нормализацию на континуум (включая автоматическую), измерение эквивалентных ширин и лучевых скоростей различными способами, кросс-корреляционный анализ и многое другое. Комплекс программ DECH активно используется астрономами разных стран и продолжает совершенствоваться. В частности, в последней версии были добавлены утилиты для анализа данных оптоволоконного эшелле-спектрографа высокого разрешения БТА САО РАН, позволяющие выполнять высокоточные измерения лучевых скоростей, в том числе для обнаружения экзопланет.

Ключевые слова: *методы: анализ данных — техника: спектральные изображения, лучевые скорости — программные средства: разработка, общее использование*

1. ВВЕДЕНИЕ

Первые версии комплекса программ обработки и анализа астрономических спектров DECH¹ были созданы в начале 1990-х годов прошлого века, когда в астрономической спектроскопии началось активное внедрение цифровых детекторов излучения, таких как панорамные счетчики фотонов, приборы с зарядовой связью (ПЗС) со всеми их преимуществами и недостатками. DECH, в отличие от универсальных систем обработки астрономических данных, таких как, например, IRAF (Tody 1986) или MIDAS (Banse et al. 1983), узкоспециализированный инструмент для решения задач астрономической спектроскопии.

Существенным отличием DECH от других популярных программ является ориентация на операционную систему Microsoft Windows. Впрочем, использование эмуляторов MS Windows позволяет обойти это ограничение. В частности, в среде таких эмуляторов DECH полностью функциональна в операционных системах семейства Linux и

Mac OS. Пакет DECH создавался в рамках концепции «программу пишет астроном для астрономов», что позволило достичь достаточно высокого уровня дружелюбности интерфейса: работа в командной строке, в основном, имеет место только во время предварительной обработки астрономических изображений до этапа экстракции спектров. Экстракция и последующий анализ спектров осуществляются в режиме «рабочий стол», когда все необходимые инструменты собраны в одном месте, в рамках одной–двух больших программ-интеграторов, практически без использования командной строки. В отличие от полностью автоматических программ обработки (так называемое pipeline) мы отказались от концепции «черного ящика», при котором все промежуточные данные остаются вне контроля пользователя. Это позволяет избежать некоторых очевидных ошибок, существенно влияющих на конечное качество результата обработки (рис. 1).

За 20 лет использования пакет DECH стал популярным инструментом среди астрономов в странах бывшего Советского Союза и за рубежом. Развитие программного пакета продолжается как для исправления обнаруженных ошибок, так и для решения новых астрофизических задач. В данной статье кратко описаны основные функции DECH, с более подробным описанием процесса обработки

*E-mail: runizag@gmail.com

¹Свободно распространяемая программа, доступна для скачивания по ссылке <http://www.gazinur.com/Download.html>. Инструкция по установке — <http://www.gazinur.com/installation.html>

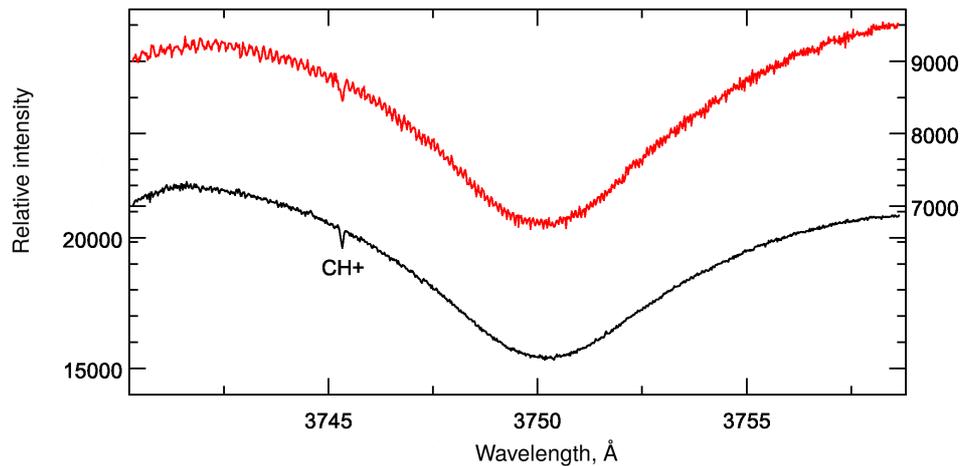


Рис. 1. Сравнение результатов обработки, полученных с помощью pipeline спектрографа UVES (вверху), с таковыми, полученными с помощью DECH (внизу). Пилообразная структура, видимая на первом спектре, вероятно, возникла вследствие ошибочного определения границ порядка в направлении поперек дисперсии.

данных, полученных с помощью нового оптоволоконного эшелле-спектрографа 6-м телескопа БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН (Valyavin et al. 2014).

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Результатом наблюдений на современных эшелле-спектрографах, оснащенных светоприемниками типа ПЗС, является спектральное изображение — таблица с числом строк и столбцов, соответствующим или кратным (если применяется программное объединение пикселей в группы) физической размерности ПЗС-матрицы. Каждая ячейка ПЗС-матрицы (пиксель) работает как независимый детектор излучения. Свойства светоприемников типа ПЗС, такие как неоднородность чувствительности пикселей, интерференция света на тонких пленках прибора и т. д., вызывают необходимость получения дополнительных калибровочных данных: bias — «смещение», изображение, полученное на ПЗС без фактического времени экспозиции и содержащее только нежелательный сигнал электроники, обрабатывающей данные датчика; flat-field — «плоское поле», спектр источника света с непрерывным спектром, т.е. без линий; спектр сравнения для построения шкалы длин волн — в спектроскопии высокого разрешения обычно используют эмиссионный спектр торий-аргоновой лампы (ThAr).

Потенциально высокое качество наблюдательного материала может быть утеряно вследствие недостаточного количества калибровочных данных или их низкого качества. Несколько рекомендаций, следуя которым можно достичь оптимального результата, в том числе в условиях нестабильной погоды:

- Изображения смещения (bias) — изображения без экспозиции (по факту используются очень короткие значения экспозиции, например, 0.1 с), без засветки светоприемника. Количество изображений bias определяется уровнем желаемого S/N . Как правило, при стабильной работе ПЗС-приемника, среднее из 10–20 изображений обеспечивает достаточное качество усредненного изображения bias. Однако для задач, требующих очень высокого отношения S/N (800–1000 и более), количество изображений bias должно быть увеличено до 100–150 (в зависимости от параметров светоприемника). Для получения среднего из нескольких изображений с примерно одинаковым уровнем сигнала используется процедура ZEROC. Процедура выполняется в командной строке, производится очистка исходных изображений с помощью медианного фильтра, после чего вычисляется среднее из очищенных изображений.
- Спектр плоского поля (flat field) — непрерывный спектр лабораторного источника света, как правило, так называемые лампы с полым катодом. Усредненный спектр плоского поля должен иметь отношение S/N как минимум не ниже, чем у наблюдаемых объектов, причем по всему диапазону длин волн. Особое внимание следует уделить голубой части спектра, где эффективность лабораторного источника света существенно ниже. Обычно требуется не менее 10 изображений плоского поля для получения среднего с достаточным уровнем S/N по всему диапазону, но если требуется S/N порядка 800–1000 или выше, необходимое количество экспозиций может достигать 100 и более. Деление исходных спектров (или изображений) на усредненное плоское поле позволяет изба-

вилься от эффектов неоднородности чувствительности отдельных пикселей и от эффектов интерференции (fringes), особенно сильных в красной области спектра.

- Оптимальное время экспозиции. Для определения времени экспозиции астрономических объектов, как правило, используют специальные онлайн-калькуляторы, которыми оснащены инструменты крупных обсерваторий. Например, калькулятор эшелле-спектрографа высокого разрешения UVES Южной Европейской обсерватории². Однако вычисленное с помощью такого калькулятора время экспозиции зачастую далеко от оптимального как по причине неточных исходных данных, так и по причинам погодного характера. Рекомендуется следующий подход: в зависимости от яркости объекта, в первую очередь следует получить минутную или секундную экспозицию. С помощью процедуры CROSSCUT (выполняется в командной строке) оценить уровень накопления, полученный за короткую экспозицию, затем вычислить оптимальное время экспозиции, позволяющее достичь примерно 70% от максимального возможного уровня накопления используемого светоприемника. Максимальное значение обычно составляет примерно 65 000, в таком случае можно ориентироваться на значение порядка 40 000–45 000 как оптимальное. При оценке уровня накопления короткой экспозиции не забываем вычесть уровень подложки (bias).
- Теллурические линии. Для решения некоторых научных задач возникает необходимость исследовать спектральные линии, находящиеся в области сильных теллурических линий (см., например, Galazutdinov et al. (2017)). Удалить теллурические линии можно двумя способами: с помощью специализированных программ, моделирующих линии поглощения в атмосфере Земли (например, Molecfit (Smette et al. 2015), TelFit (Gullikson et al. 2014) и др.), либо помощью теллурического стандарта («divisor») — спектра горячей звезды без межзвездного покраснения (например, HD 116658 (Спика) или HD 120315), предпочтительно с быстрым вращением. К сожалению, модельные спектры теллурических линий, как правило, не обеспечивают приемлемое качество удаления насыщенных теллурических линий. Модельный метод не дает приемлемый результат, если требуется отношение $S/N > 200$. Деление на спектр теллурического стандарта может обеспечить высокое качество очищенного спектра,

если соблюдать следующие условия: спектр исследуемого объекта и спектр стандарта получены на примерно одинаковых зенитных расстояниях; спектр стандарта не имеет линий со сложным профилем в интересующей области длин волн. Очевидно, спектр стандарта должен иметь высокое отношение S/N — желательно как минимум на 20% более высокое, чем у исследуемого объекта. Процедура удаления теллурических линий представлена в программе DECH-FITS пакета программ³. Процедура обеспечивает коррекцию (при необходимости) интенсивности теллурических линий и коррекцию их положения, если спектры немного сдвинуты относительно друг друга. Примеры спектра до и после очистки можно увидеть, например, в работе Galazutdinov et al. (2017).

- Спектр для калибровки длин волн — спектр сравнения. Обычно это спектр торий-аргоновой лампы (ThAr). В красной области спектра присутствуют очень мощные линии аргона, как правило, насыщенные, и они могут повлиять даже на соседние спектральные порядки. Чтобы избежать этого эффекта, рекомендуется получить 20 или более спектров ThAr с относительно короткой экспозицией, затем получить среднее изображение с помощью процедуры ZEROC. Это позволит избежать чрезмерного влияния мощных линий аргона на соседние порядки, достичь хорошего отношения S/N даже у слабых линий тория и одновременно очистить спектр от следов космических частиц. Также для контроля шкалы длин волн можно с успехом использовать спектр Солнца, как вариант, получив спектр отраженного солнечного света от яркого облака или Луны. Точные длины волн линий солнечного спектра даны, например, в статье Allende Prieto and Garcia Lopez (1998).

3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Предварительная обработка данных включает получение среднего из изображений bias, плоского поля и спектра сравнения с последующим вычитанием первого из всех остальных изображений. Для получения среднего изображения любого типа используется процедура ZEROC. Вычитание среднего изображения bias из всех остальных осуществляется с помощью процедуры SUB. Для предварительного контроля однородности исходных данных применяется процедура CROSSCUT.

²<https://www.eso.org/observing/etc/bin/gen/form?~INS.NAME=UVES+INS.MODE=spectro>

³Опция «Curve | Remove Telluric Lines» в программе DECH95.

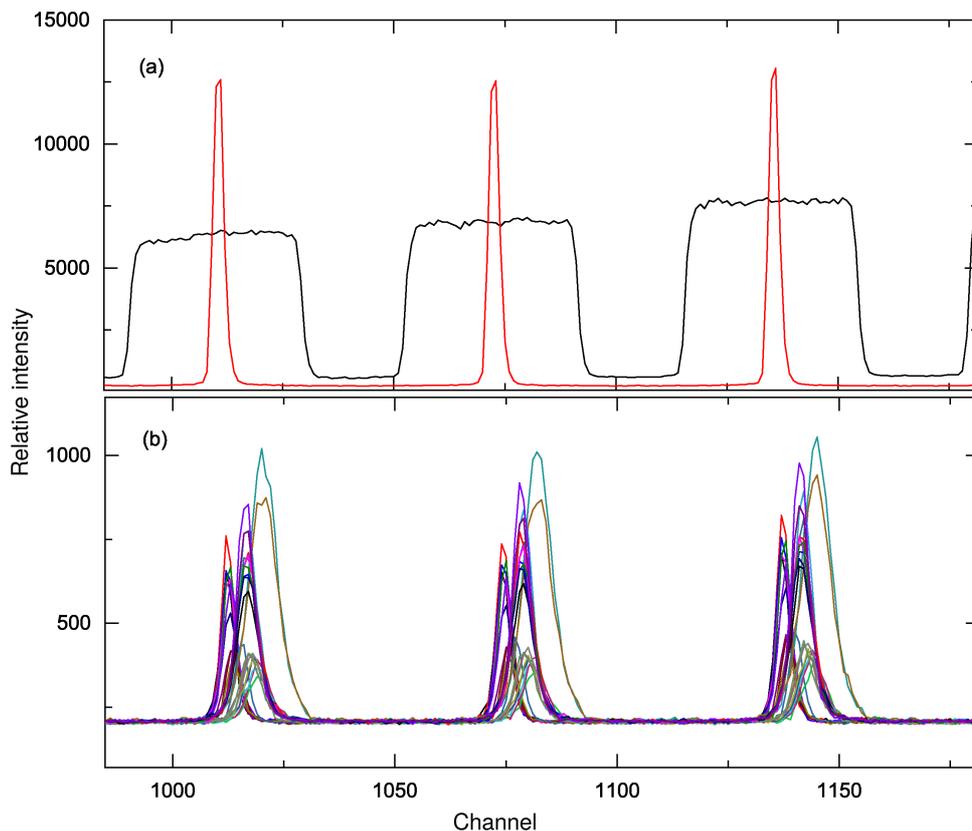


Рис. 2. Фрагменты поперечных разрезов изображений спектрографа UVES. (a) — спектр плоского поля (широкие порядки) и спектр специального изображения ORDERREF, используемого для определения положения спектральных порядков. (b) — набор спектров астрономических объектов, полученных в течение одной ночи при неизменной конфигурации спектрографа. Хорошо виден разброс положения и формы спектральных порядков от объекта к объекту.

Важное замечание касательно учета плоского поля: дело в том, что коррекция спектров астрономических объектов с помощью спектра плоского поля может выполняться двумя способами — на этапе обработки изображений, путем деления изображений объектов на изображение плоского поля, или уже после экстракции спектров, путем деления экстрагированных спектров. Для щелевых спектрографов следует использовать первый способ. Это связано с переменным от объекта к объекту распределением сигнала по высоте щели. Характерный пример — спектрографы UVES или MIKE, где высота щели значительна, а ширина спектральных порядков (в направлении поперек дисперсии) меняется в зависимости от яркости объекта, качества изображений на небе, качества гидирования и других факторов. Для оптоволоконных спектрографов (включая спектрограф высокого разрешения 6-м телескопа САО РАН) предпочтительнее второй способ.

Для учета плоского поля первым способом, то есть до экстракции спектров, после вычитания bias из отдельных изображений плоского поля следует получить среднее (с помощью программы ZEROC),

затем вычесть из него рассеянный свет. Для этого придется определить положение и ширину спектральных порядков (см. раздел 4.1). После вычитания рассеянного света изображение должно быть нормализовано⁴. Деление исходных изображений с уже вычтенным усредненным bias на нормализованное плоское поле можно выполнить программами FLATC или IMARITH.

Предварительная обработка данных, полученных с помощью оптоволоконных спектрографов, в том числе спектрографа 6-м телескопа БТА САО РАН, проще и выполняется в два этапа. Сначала получают среднее изображение bias, затем вычитают его из всех остальных изображений, после чего переходят к экстракции.

4. ЭКСТРАКЦИЯ СПЕКТРОВ

Для экстракции спектров из изображений используется программа DECH95. Процедура включает следующие операции:

⁴Процедура «Mask|Normalize apertures (Apnormalize)» в программе DECH95.



Рис. 3. Фрагмент спектрального изображения астрономического объекта. Стрелкой указана область насыщенных теллурических линий.

- построение маски, то есть определение положения (траектории вдоль дисперсии) и границ спектральных порядков (ширины поперек дисперсии);
- вычитание рассеянного света;
- экстракцию.

4.1. Построение маски

Маска — это таблица с информацией о положении и ширине спектральных порядков. В DECH маска дается в виде набора коэффициентов полинома Чебышева для каждого спектрального порядка отдельно. Маска, созданная средствами DECH, записывается в формате системы обработки IRAF и может использоваться для экстракции спектра средствами IRAF, например, процедурами `apall` или `apsum`.

Для оптоволоконных спектрографов характерна высокая стабильность положения спектральных порядков, поэтому, как правило, достаточно одной маски для всех изображений, полученных в фиксированной конфигурации прибора. Для щелевых спектрографов ситуация сложнее: по причинам, указанным выше, как положение, так и ширина спектральных порядков могут изменяться от объекта к объекту. Поэтому необходима коррекция маски для каждого отдельного изображения (см. рис. 2b).

Для построения основной маски обычно используют спектральные изображения поля либо, как у спектрографа UVES, — специальное изображение, в котором щель спектрографа ограничивается по высоте (рис. 2a). Теоретически, для построения маски допускается использование хорошо накопленного изображение любого объекта с выраженным непрерывным спектром, лучше горячей звезды. Однако в этом случае могут

возникнуть проблемы с определением положения спектральных порядков в областях с мощными теллурическими линиями, достигающими уровня насыщения на значительном протяжении (рис. 3). Это может повлечь необходимость интерактивной коррекции маски.

Первичная маска представляет собой набор кривых, проходящих приблизительно вдоль центра поперечных разрезов по всей длине спектральных порядков. На первом этапе ширина порядков не определяется. Центр спектрального порядка — термин условный. Не рекомендуется использовать в качестве центра пиксель с максимальным сигналом, особенно для спектров с низким уровнем накопления. Профиль поперечного разреза порядка зачастую не симметричен. Это характерно, например, для щелевых спектрографов или спектрографов с резателем изображения. Поэтому в качестве центра поперечного разреза порядка оптимально использовать центр тяжести, как показано в уравнении (1). Уравнение определяет центр тяжести спектрального порядка m в поперечном разрезе через пиксель x . Суммирование ведется по вертикали (перпендикулярно главной дисперсии) от верхней ($v1$) к нижней границе порядка ($v2$):

$$G_{mx} = \sum_{y=v1}^{v2} I_{xy} \times y / \sum_{y=v1}^{v2} I_{xy}, \quad (1)$$

где I_{xy} — интенсивность сигнала в пикселе с координатами x и y .

Для создания первичной маски необходимо определить центры тяжести вдоль каждого спектрального порядка с конкретным шагом⁵, обычно

⁵Процедура «Mask | Create Mask» в программе DECH95.

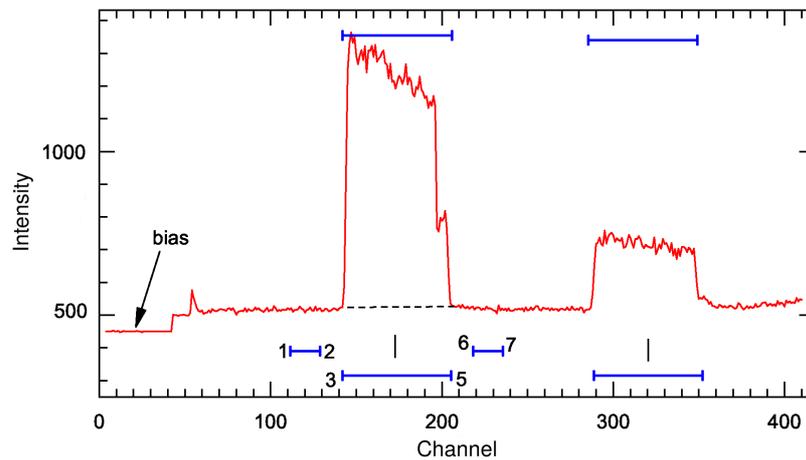


Рис. 4. Фрагмент поперечного разреза эшелле-спектра с двумя спектральными порядками. Показаны уровень смещения — bias, — границы левого порядка (от 3 до 5) и границы двух областей межпорядковых минимумов слева и справа от порядка (цифры 1, 2 и 6, 7 соответственно). Прерывистая линия соответствует уровню рассеянного света.

через каждые 10–20 пикселей по всей длине порядка. Затем, отдельно для каждого порядка, через эти центры проводится аппроксимирующая кривая, как правило, в виде полинома Лежандра или Чебышева 3–5 степени. В редких случаях может потребоваться аппроксимирующий сплайн.

Следующий шаг включает в себя определение границ порядков и границ межпорядковых минимумов (см. рис. 4). Это процедуры выполняются в режиме редактирования маски⁶. Некорректное определение границ порядка может привести к появлению пилообразной структуры или неоправданно низкому отношению сигнал/шум, если ширина порядка недостаточна или неоправданно увеличена. Некорректное определение границ межпорядковых минимумов приводит к ошибкам в вычитании рассеянного света с фатальными последствиями для качества экстрагированного спектра: становится невозможным правильный учет плоского поля; интенсивности спектральных линий и, соответственно, эквивалентные ширины будут искажены.

Автоматическое определение границ порядков в DECH выполняется после определения уровня рассеянного света. Для этого в режиме редактирования маски через зоны межпорядковых минимумов проводится аппроксимирующая кривая. Тип оптимальной аппроксимирующей функции определяется интерактивно. Как правило, ломаная (PolyLine) дает хороший результат. После определения уровня рассеянного света становится доступной опция автоматического определения границ порядков. Автоматическое определение ширины порядка может быть некорректным для порядков с низким отношением S/N . Обычно ручная коррекция границ порядка и зон межпорядковых минимумов

⁶Процедура «Mask | Edit» в программе DECH95.

требуется для первого и последнего порядков, где наиболее низкое отношение S/N .

Полученная маска сохраняется в специальном файле в формате IRAF с возможностью последующего внесения изменений. Важно отметить, что тип функций, аппроксимирующих распределение рассеянного света, вообще говоря, не связан с маской. Эта информация используется на этапе экстракции. Маска содержит информацию только о траектории (форме) и ширине спектральных порядков.

Распределение рассеянного света представляет собой двумерную функцию сложной формы. Для вычитания рассеянного света на первом этапе определяются «несущие» кривые, проходящие через зоны межпорядковых минимумов в направлении перпендикулярном спектральным порядкам. Такие кривые строятся вдоль всего изображения с равным шагом, как правило, через каждые 10 пикселей. На следующем этапе через эти «несущие» проводятся аппроксимирующие кривые, проходящие в направлении главной дисперсии через каждую строку изображения. Как правило, хороший результат дает сплайн-интерполяция с предварительным сглаживанием исходных данных по семи точкам.

Каждый порядок на изображении спектра оптоволоконного спектрографа БТА имеет два субпорядка: один служит для регистрации астрономического объекта, второй — для регистрации спектра торий-аргоновой лампы. Последний используется для контроля стабильности спектрографа, что необходимо для прецизионных измерений лучевых скоростей. Поэтому для экстракции спектров, полученных с помощью этого спектрографа, требуется иметь две маски: первую для субпорядков со спектром астрономического объекта, вторую для

субпорядков со спектром сравнения. Использовать для построения маски изображения с двумя видимыми субпорядками не очень удобно. Как уже упоминалось выше, удобнее применять спектр плоского поля без использования канала спектра сравнения. С помощью такой маски, построенной по спектру плоского поля, можно экстрагировать спектры астрономических объектов. Чтобы создать маску для экстракции спектра сравнения, достаточно сдвинуть «звездную» маску на фиксированное количество пикселей влево (в конфигурации прибора на 2022 год) или вправо, в зависимости от расстановки субпорядков на изображении. Это процедура выполняется в режиме редактирования маски («Mask | Edit Mask») в программе DESN95.

4.2. Экстракция

Результатом экстракции⁷ является спектр в общепринятом смысле — таблица из двух столбцов: номер пикселя в первом и интенсивность — во втором. При дальнейшей обработке номер пикселя преобразуется в длину волны.

Процедура экстракции включает вычитание рассеянного света, учет наклона щели (при необходимости) и собственно экстракцию спектра — суммирование сигнала в направлении, перпендикулярном направлению главной дисперсии, то есть вдоль ширины спектрального порядка, в рамках границ, определенных маской и по всей длине порядка. Экстракция выполняется отдельно для каждого спектрального порядка, результат сохраняется в файле формата FITS.

Как уже отмечалось выше, в некоторых случаях, например, для спектров UVES, учет плоского поля выполняется на этапе обработки изображений. В таком случае вычитание рассеянного света должно быть выполнено до экстракции. Для этого используется маска, последовательность действий точно такая же, как при экстракции, с той разницей, что в процедуре экстракции включается только триггер вычитания рассеянного света. Изображения с вычтенным рассеянным светом сохраняются в файлах с суффиксом «sub». Таким же образом вычитается рассеянный свет из изображения усредненного плоского поля. Затем изображение плоского поля нормализуется⁸. После чего все изображения с вычтенным рассеянным светом делятся на нормализованное плоское поле⁹.

⁷Процедура «Extraction | Using mask...» в программе DESN95.

⁸Процедура «Mask | Normalize Apertures (Apnormalize)» в программе DESN95.

⁹Деление изображений выполняется в командной строке с помощью программы FLATC или IMARITH.

Существует два основных метода экстракции спектров из эшелле-изображений: простое суммирование и так называемая оптимальная экстракция Horne (1986). Суммирование — наиболее простой и быстрый метод. Для извлечения спектра в векторной форме данные изображения складываются в каждом столбце (поперек направления основной дисперсии в рамках границ порядка по ширине) с одинаковым весом в заданной апертуре:

$$F(x) = \sum_{y=v1}^{v2} I_{xy}. \quad (2)$$

Метод «оптимальной экстракции» был развит в работах (Horne 1986, Marsh 1989, Mukai 1990). Суть метода заключается в том, что при интегрировании поперечного разреза спектра предварительно определяется вес каждого слагаемого: чем ниже сигнал в точке профиля, тем меньше ее вес. Это позволяет уменьшить влияние пикселей на периферии поперечного профиля. Более точное определение границ порядка позволяет снизить значимость применения оптимальной экстракции. Действительно, при интегрировании спектра мы сталкиваемся с дилеммой: с одной стороны, желательно иметь апертуру интегрирования как можно шире, чтобы захватить весь полезный сигнал, но, с другой стороны, на некотором, условно далеком от центра порядка расстоянии, сигнал уже существенно зашумлен, и его учет может привести к ухудшению качества. Для решения этой проблемы мы должны определить профиль $P(x, y)$, отражающий распределение сигнала в порядке. Непременным условием является нормированность профиля в рамках апертуры интегрирования — $\sum P(x, y) = 1$. Собственно оптимизация заключается в последующем переопределении $P(x, y)$: для каждой координаты y разрез аппроксимируется полиномом, причем этот процесс повторяют, отбрасывая точки, отклоняющиеся от аппроксимирующей кривой более чем на $k\sigma$ ($k = 2 \dots 3$), до тех пор, пока все используемые точки не будут входить в рамки $k\sigma$. Однако описанная схема оптимальной экстракции реально эффективна только при работе со спектрами с достаточным количеством точек в профиле, слабо изменяющемся с длиной волны. В работах Marsh (1989), Mukai (1990) были развиты методы оптимальной экстракции с искривленными спектрами и спектрами с изменяющимся пространственным профилем. Для более точного определения пространственного профиля $P(x, y)$ применяется понятие «виртуального переопределения» спектра: между пикселями профиля спектра (в направлении кросс-дисперсии) вводятся дополнительные виртуальные «пиксели» (обычно не более 10), отсчеты в которых переопределяются на основе линейной

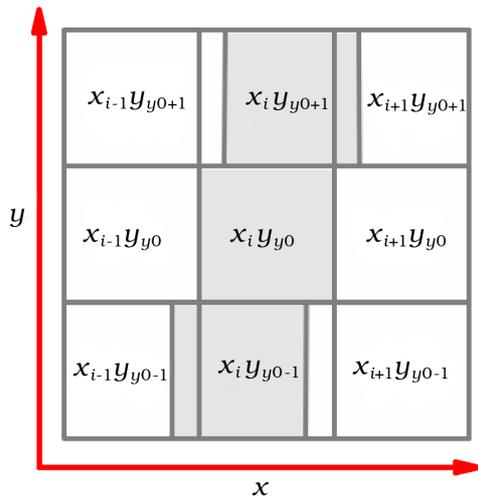


Рис. 5. Схема распределения сигнала на матрице ПЗС при наличии наклона щели. Серым цветом показана проекция наклонной щели на матрицу ПЗС.

регрессии так, чтобы суммарный сигнал остался неизменным. При сильном изменении профиля спектра с длиной волны попытка его «сглаживания» может испортить спектр. В этом случае простым и эффективным решением может быть разбивка спектра на фрагменты по длине волны, в которых изменение профиля незначительно. В DECH95 реализованы оба метода экстракции спектров: стандартный и оптимальный. Оптимальная экстракция может дать положительный эффект только для спектров с невысоким отношением S/N . Для спектров с высоким уровнем накопления обычное суммирование более предпочтительно.

4.2.1. Учет наклона щели

Конструкция некоторых эшелле-спектрографов (например, спектрограф MIKE (Bernstein et al. (2003) 6.5-м телескопа Clay обсерватории Las Campanas) такова, что линии на спектральном изображении существенно отклоняются от вертикали, причем степень отклонения меняется как вдоль порядков, так и вдоль направления главной дисперсии. Обычная экстракция спектра из таких изображений приводит к потере спектрального разрешения и искажению профиля спектральных линий.

Для оценки степени наклона щели введем параметр $N_{xy} = \Delta x / \Delta y$ так, что $N_{xy} = 0$, если щель расположена строго вертикально. Например, если $N_{xy} \sim 0.2$ (рис. 5), суммирование спектра (экстракция) с учетом наклона щели должно быть выполне-

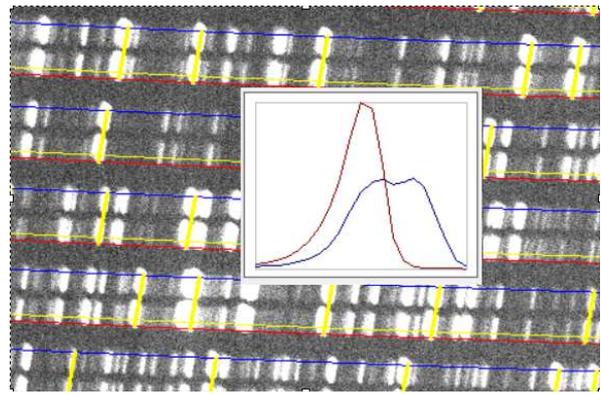


Рис. 6. Фрагмент эшелле-спектра торий–аргона, полученный с помощью спектрографа MIKE. Виден фрагмент карты наклонов (прямые наклонные линии, проходящие через избранные линии тория), построенной с помощью процедуры «Mask | Make Tilt Map» программы DECH95. Показаны два экстрагированных профиля: результат интегрирования с учетом наклона щели (более узкий) и результат интегрирования без учета наклона (широкий профиль с двумя пиками).

но следующим образом:

$$\begin{aligned}
 F(x) = & I(x_i, y_{y0}) + 0.8 I(x_i, y_{y0+1}) \\
 & + 0.2 I(x_{i+1}, y_{y0+1}) + \dots \\
 & + 0.8 I(x_i, y_{y0-1}) \\
 & + 0.2 I(x_{i-1}, y_{y0-1}) + \dots
 \end{aligned} \quad (3)$$

Весь алгоритм включает следующие шаги:

- Создать карту значений $\Delta x / \Delta y$ по всему изображению. Для построения такой карты следует использовать спектр торий–аргона с достаточно высокой щелью.
- Аппроксимировать полученные оценки наклона двумерным полиномом, так что для любой координаты (x, m) спектрального изображения (где x — номера пикселя, m — номер порядка) можно вычислить значение N_{xy} . В случае спектрографа MIKE достаточно второй степени полинома для обеих координат¹⁰.
- Применить полученный результат при экстракции¹¹.

Сравнение экстракции с учетом наклона щели и без него показано на рис. 6.

¹⁰Процедура «Mask | Solve Tilt Surface» в программе DECH95.

¹¹Опция «Fix the Tilted Slit» в процедуре «Extraction | Using mask» в программе DECH95.

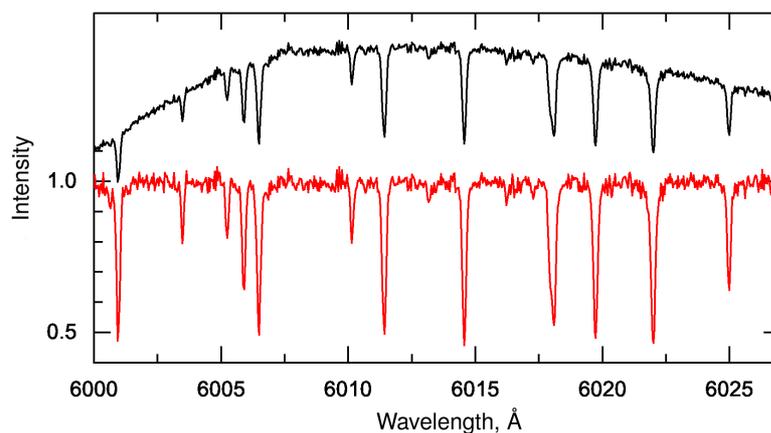


Рис. 7. Пример автоматической нормализации на континуум.

5. РАБОТА С ЭКСТРАГИРОВАННЫМИ СПЕКТРАМИ

После экстракции спектров средствами DECH для каждого из них получаем два FITS-файла: в одном хранится собственно спектр, экстрагированный из субпорядка объекта исследования, в другом — соответствующий спектр торий–аргона, экстрагированный из субпорядка искусственной звезды. Последний имеет окончание «_ThAr.fits». Начало имени файла совпадает с базовым именем файла спектра собственно объекта.

Для построения шкалы длин волн рекомендуется использовать усредненное изображение спектров торий–аргона с одинаковыми, достаточно короткими экспозициями (см. раздел 2). Процесс построения дисперсионной кривой в эшелле-спектре примерно такой же, как в IRAF. Первый шаг — идентификация линий тория в двух порядках¹², аппроксимация этих реперов двумерным полиномом¹³ вида:

$$\lambda(x, m) = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^n a_{ij} x^i m^j,$$

где a_{ij} — коэффициенты полинома; x — координата репера в пиксельном пространстве (главная дисперсия); m — координата репера в пространстве спектральных порядков. Полученное решение не является окончательным, но позволяет отождествить основную массу линий всех порядков спектра торий–аргона в автоматическом режиме. Может потребоваться вручную отождествить первый и последний порядки для избежания экстраполяции, затем повторить аппроксимацию и уже

¹²Процедура «Curve | Dispersion Curve Workshop | Create It» в программе DECH-FITS.

¹³Процедура «Curve | Dispersion Curve Workshop | Global Fit & Create FDS file» в программе DECH-FITS.

после этого отождествить все остальные линии с помощью автоматической процедуры. Для оптоволоконного спектрографа БТА (по состоянию на 2022 год) рекомендуемая степень полинома по пикселям — 5, по порядкам — 4. Обычно дисперсионная кривая строится примерно по 700–1000 реперам, среднеквадратическая ошибка аппроксимации не превышает 0.003 Å. Полученное решение записывается в формате IRAF в FITS-заголовок всех файлов (спектров) наблюдательного сета, после чего спектры готовы для дальнейшей обработки и анализа как в DECH, так и в IRAF.

Нормализация на континуум может быть выполнена как вручную, так и автоматически. Автоматическая нормализация дает хороший результат для спектров с узкими линиями, например, солнечного типа (см. рис. 7). В сложных спектрах с широкими линиями, эмиссиями и/или с сильным блендированием предпочтительно использовать ручной режим.

5.1. Измерение лучевых скоростей методом кросс-корреляции

Метод кросс-корреляции активно используется в астрономии для измерения лучевой скорости наблюдаемого объекта. В DECH реализован метод, предложенный Simkin (1974) и детализированный в работе Tonry and Davis (1979). Измерение смещения спектральных линий в спектре объекта, наблюдаемого в разные даты, сводится к двум процедурам: контролю стабильности средств наблюдения и регистрации; измерению смещения линий в исследуемом спектре относительно спектра-образца (template). Вторая процедура, в свою очередь, включает в себя собственно измерение смещения и расчет барицентрической поправки на основе алгоритма, предложенного Stumpf (1979). Точность определения барицентрической поправки не хуже

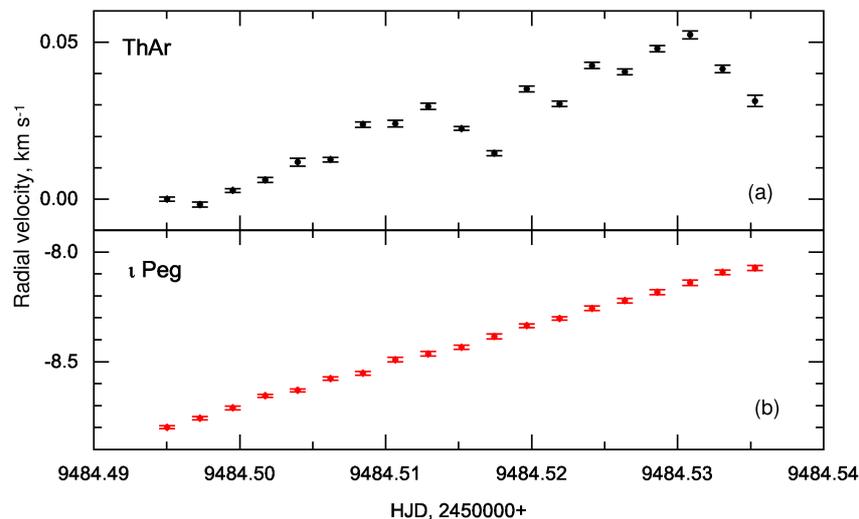


Рис. 8. Кросс-корреляционный анализ спектров звезды ι Peg (b), полученных в течение одного часа наблюдений 26 сентября 2021 г. Учтены все поправки, включая поправку за механическую нестабильности прибора (a), измеренную с помощью одновременной регистрации спектра торий–аргона.

50 см с^{-1} , что предъявляет высокие требования к точности исходных данных, таких как эффективное время экспозиции, координаты места наблюдений и наблюдаемого объекта.

Конструкция спектрографа БТА такова, что проекции выходов двух волокон, образующих спектры соседних субпорядков, расположены не строго вертикально друг под другом, но под некоторым углом. Это вызвано значительной толщиной оплетки волокон и ограничениями на возможный промежуток между субпорядками. Наличие этого наклона приводит к тому, что шкала длин волн, построенная по субпорядку торий–аргона, имеет постоянный сдвиг относительно шкалы длин волн субпорядка с спектром объекта. По состоянию на август 2022 г. величина сдвига составляет примерно 127 км с^{-1} .

Как уже было отмечено, контроль механической стабильности прибора осуществляется с помощью спектра торий–аргона, который наблюдается одновременно с астрономическим объектом. На рис. 8 можно оценить механическую стабильность прибора на 19 последовательных экспозициях, полученных в течение примерно 60 мин 26 сентября 2021 г. Эксперименты с методикой показали, что наибольший вклад в ошибку измерения вносят спектральные порядки с одной–двумя доминирующими линиями, необязательно насыщенными. Наилучший результат был достигнут с маскированием таких линий. Для кросс-корреляции были выбраны области длин волн, свободные от мощных линий. По состоянию на август 2022 г. величина ошибки измерения не превышает $10\text{--}20 \text{ м с}^{-1}$ для звездных спектров и примерно $1\text{--}2 \text{ м с}^{-1}$ для

торий–аргона. С увеличением количества и протяженности спектральных порядков после установки штатной камеры точность должна вырасти минимум вдвое. Механическая стабильность прибора будет существенно улучшена после установки системы непрерывной подачи азота в криостат камеры ПЗС.

Для измерения лучевой скорости в любой точке профиля выбранной линии DECH предоставляет способ совмещения прямого и зеркального профилей линии. Путем ручного совмещения того или иного зеркального (по оси длин волн) и оригинального фрагментов исследуемого профиля можно оценить лучевую скорость компонентов профилей любой сложности. Такой способ отсутствует в других системах анализа астрономических спектров.

5.2. Измерение эквивалентных ширин

DECH предоставляет возможность измерения эквивалентных ширин (EW) несколькими способами. Классические способы включают прямое интегрирование, аппроксимацию линий профилем Гаусса, Лоренца, Фойгта и автоматическое разделение бленд. Также есть возможность оценки эквивалентной ширины путем произвольного построения профиля вручную. Этот способ может быть единственной возможностью измерения линий с сильным блендированием, когда в спектре представлена лишь часть профиля интересующей линии (см. рис. 9).

Для удобства измерения и анализа результатов предоставляется возможность использования списков линий отождествления различных форматов, включая представленные в базе данных VALD

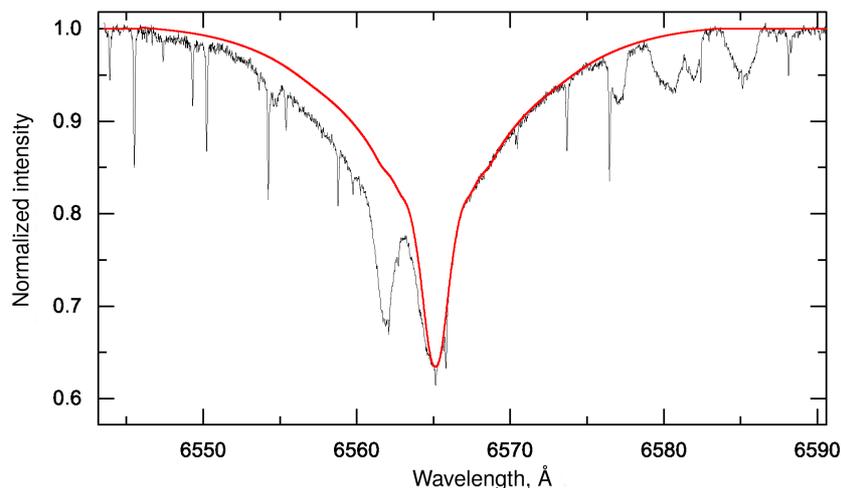


Рис. 9. Пример измерения эквивалентной ширины произвольно построенным профилем.

(Pakhomov et al. 2019). При этом результаты измерений сохраняются вместе со всеми атомными данными линии, что упрощает последующий анализ спектров методом моделей атмосфер.

Оценка ошибки измерения эквивалентных ширин — непростая задача и не имеет решения в общем виде. В DECH ошибка EW вычисляется двумя способами. Для достаточно мощных и широких линий рекомендуется использовать ошибку, определенную с помощью уравнения 7 из работы Vollmann and Eversberg (2006), в котором также учитывается интенсивность измеряемой линии. Для слабых и узких линий рекомендуется использовать значение ошибки, вычисляемое как произведение ширины линии на обратную величину отношения S/N ¹⁴.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЕ ЗАМЕЧАНИЕ

По состоянию на 2022 г. оптоволоконный эшелле-спектрограф высокого разрешения БТА не имеет штатной камеры, поэтому значительная часть спектра на краях спектральных порядков виньетирована. Как следствие, значительная часть светоприемника ПЗС-камеры остается неиспользованной, поэтому рекомендуется предварительно вырезать информативную часть кадра¹⁵.

Комплекс программ DECH используется астрономами разных стран для обработки и анализа астрономических спектров более 20 лет. На основе измерений, сделанных с помощью DECH, написаны

¹⁴В программе DECH-FITS обозначена как `errOld`.

¹⁵Фрагмент с информативной частью можно вырезать командой `trim 124 1633 266 1790 *.fits`. Команда выполняется для всех изображений до всех последующих этапов обработки. После установки штатной камеры спектрографа этот шаг можно будет пропустить.

сотни публикаций. Работа по совершенствованию DECH продолжается. Последняя модификация пакета программ включает утилиты для анализа данных оптоволоконного эшелле-спектрографа высокого разрешения БТА САО РАН, позволяющие выполнять высокоточные измерения лучевых скоростей, в том числе для обнаружения экзопланет. Детальное описание процедур и команд опубликовано в инструкции пользователя спектрографа.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Проект был поддержан Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 075-15-2020-780.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. Banse, P. Crane, P. Grosbol, et al., *The Messenger* **31**, 26 (1983).
2. R. Bernstein, S. A. Shectman, S. M. Gunnels, et al., *SPIE Conf. Proc.* **4841**, 1694 (2003).
3. C. Allende Prieto, R. J. Garcia Lopez, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **131**, 431 (1998).
4. G. A. Galazutdinov, V. V. Shimansky, A. Bondar, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **465**, 3956 (2017).
5. K. Gullikson, S. Dodson-Robinson, A. Kraus, *Astron. J.* **148**, 53 (2014).
6. K. Horne, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **98**, 609 (1986).
7. T. R. Marsh, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **101**, 1032 (1989).
8. K. Mukai, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **102**, 183 (1990).

9. Yu. V. Pakhomov, T. A. Ryabchikova and N. E. Piskunov, *Astronomy Reports* **63**, 1010 (2019).
10. S. M. Simkin, *Astron. and Astrophys.* **31**, 129 (1974).
11. A. Smette, H. Sana, S. Noll, et al., *Astron. and Astrophys.* **576**, A77 (2015).
12. P. Stumpff *Astron. and Astrophys. Suppl.* **78**, 229 (1979).
13. D. Tody, *SPIE Conf. Proc.* **627**, 733 (1986).
14. J. Tonry, M. Davis, *Astron. J.* **84**, 1511 (1979).
15. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al., *Astrophysical Bulletin* , **69**, 224 (2014).
16. K. Vollmann and T. Eversberg, *Astronomische Nachrichten*, **327** (9), 862 (2006).

DECH: a Software Package for Astronomical Spectral Data Processing and Analysis

G. A. Galazutdinov^{1,2}

¹Crimean Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nauchny, 298409 Russia

²Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

The article provides a brief description of the software package **DECH** for processing and analysis of astronomical spectra. **DECH** supports all stages of processing and analysis of spectral data, including image preprocessing, spectra extraction (including those with a variable tilted slit), wavelength calibration by a two-dimensional polynomial, continuum normalization (manual or automatic), measurement of equivalent widths and radial velocities in various ways, cross-correlation analysis, etc. The **DECH** software package is actively used by astronomers from different countries and continues to be improved. In particular, utilities for processing and analysis of data from the high-resolution fiber-feed echelle spectrograph installed at 6-m telescope of Special Astrophysical Observatory of Russian Academy of Sciences were added in the latest version. Software provides high-precision measurements of radial velocities, including those for detection of extraterrestrial planets.

Keywords: methods: data analysis—techniques: imaging spectroscopy, radial velocities—software: development, public release