

# Обработка данных эшелюного спектрографа “Радуга”

Н.Шатский, ГАИШ МГУ

7 ноября 2005 г.

# Оглавление

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Общее описание методики редукции</b>                              | <b>6</b>  |
| 1.1      | Типы данных и организация последовательности редукции . . . . .      | 6         |
| 1.2      | Обработка изображений различных типов в “трубе” . . . . .            | 8         |
| 1.3      | Обработка кадров подложки . . . . .                                  | 8         |
| 1.4      | Обработка спектров ЛН . . . . .                                      | 8         |
| 1.5      | Обработка спектров ЛПК . . . . .                                     | 11        |
| 1.6      | Обработка спектров объектов и стандартов спектрофотометрии . . . . . | 11        |
| <b>2</b> | <b>Детали реализации алгоритмов редукции данных</b>                  | <b>13</b> |
| 2.1      | Характер переменности кадров подложки и их обработка . . . . .       | 13        |
| 2.2      | Настройка процедуры выделения порядков эшеле . . . . .               | 16        |
| 2.3      | Определение плохих колонок ПЗС-матрицы . . . . .                     | 19        |
| 2.4      | Переменность положения и формы порядков эшеле . . . . .              | 19        |
| 2.5      | Экстракция спектра и космические частицы . . . . .                   | 20        |
| 2.6      | Повышение стабильности и точности калибровки длин волн . . . . .     | 24        |
| 2.7      | Проблема плоского поля и профиль функции блеска . . . . .            | 29        |
| 2.8      | Спектрофотометрическая калибровка кривой реакции . . . . .           | 33        |
| 2.9      | Алгоритм работы PIPE/RADU . . . . .                                  | 33        |
| <b>3</b> | <b>Работа с контекстом RADUGA при редукции данных</b>                | <b>36</b> |
| 3.1      | Установка контекста RADUGA . . . . .                                 | 36        |
| 3.2      | Создание рабочей структуры директорий . . . . .                      | 37        |
| 3.3      | Обработка данных положения порядков (кадров ЛН) . . . . .            | 38        |
| 3.4      | Создание среднего профиля блеска BLAZE . . . . .                     | 39        |
| 3.5      | Группировка данных сета по положению порядков эшеле . . . . .        | 39        |
| 3.6      | Усреднение баланс-спектров и профилей порядков по группам . . . . .  | 41        |
| 3.7      | Начальная ручная калибровка длин волн . . . . .                      | 41        |
| 3.8      | Обработка всей совокупности спектров ночи . . . . .                  | 43        |
| 3.9      | Работа с файлами результатов обработки . . . . .                     | 44        |
| <b>4</b> | <b>Кросс-корреляционная обработка спектров</b>                       | <b>45</b> |
| 4.1      | Основные принципы и подходы к коррелированию . . . . .               | 45        |
| 4.2      | Детали реализации . . . . .  | 48        |
| 4.3      | Использование корреляционной обработки . . . . .                     | 53        |
| <b>A</b> | <b>Выходные файлы редукции данных спектрографа “Радуга”</b>          | <b>56</b> |

# Список иллюстраций

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.1 | Общая схема редукции данных спектрографа “Радуга” . . . . .  | 9  |
| 2.1 | X-разрез кадра подложки ПЗС-камеры САО РАН . . . . .   | 15 |
| 2.2 | Среднее изображение подложки ПЗС-камеры S1000 САО РАН . . . . .  | 15 |
| 2.3 | Остаточные отклонения измеренных положений порядков . . . . .  | 18 |
| 2.4 | Сдвиг профиля порядка из-за неэффективности переноса заряда . . . . .  | 22 |
| 2.5 | Зависимость числа найденных космических частиц от времени экспозиции . . . . .   | 23 |
| 2.6 | Остаточные отклонения измеренных положений линий ЛПК . . . . .   | 25 |
| 2.7 | Аппроксимация профиля блеска порядков полиномом . . . . .  | 30 |
| 2.8 | Зависимость отношения S/N от накопленного сигнала . . . . .  | 32 |
| 3.1 | Линии спектра ЛПК для ручной калибровки . . . . .  | 42 |
| 4.1 | Блок-схема корреляции в стиле CORAVEL . . . . .  | 46 |
| 4.2 | Блок-схема “прямой” корреляции со сдвигаемым синтетическим спектром . . . . .  | 47 |
| 4.3 | Полуширины гауссиан профилей линий лампы с полым катодом спектрографа “Радуга”, аппроксимированные полиномом третьего порядка. . . . . | 50 |

## Список таблиц

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Линии ЛПК, выведенные из опорного каталога . . . . .             | 27 |
| 2.2 | Линии ЛПК, введённые в опорный каталог (длины волн в Å). . . . . | 28 |

В настоящем документе изложены основы и детали процедуры первичной обработки ПЗС-изображений эшелельных спектров, полученных с оптико-волоконным спектрометром “Радуга”, построенным в ГАИШ. Целью этой процедуры является совместный анализ калибровочных изображений и изображений спектров объектов, в результате которого получаются спектры объектов в пространстве “длина волны – относительная интенсивность”. Выходной спектр несет точную калибровку по длинам волн и, насколько возможно для спектрографа без компенсатора атмосферной дисперсии, исправлен за эффект неравной чувствительности системы в разных длинах волн.

Кроме выходного (одномерного) спектра, полезны также и промежуточные продукты анализа – по-порядковые спектры в пространстве “длина волны – сигнал” $_m$  для детальной оценки профилей линий и оценок отношения “сигнал/шум” в заданной длине волны, и в пространстве “номер столбца ПЗС  $X$  – сигнал” $_m$  для кросс-корреляции порядков спектра с спектрами-масками с целью определения лучевых скоростей звёзд-объектов доплеровским методом в стиле CORAVEL. Последние удобны тем, что обратная дисперсия порядков ( $\text{\AA}/\text{mm}$ ) эшелеле-спектра пропорциональна центральной длине волны порядка, как и доплеровские сдвиги линий, что позволяет искать одну величину линейного сдвига изображений спектральных линий для всех порядков. Здесь  $m$  – это номер порядка спектра, который в рассматриваемой системе варьирует в пределах от 32 (красная область) до 56 (синяя область).

Такая направленность редукции (набор выходных данных, наилучшая возможная точность калибровки по длине волны и достаточно грубая спектрофотометрическая точность) отражает основное назначение спектрографа “Радуга” — исследование кинематики и двойственности (или пульсаций) звёзд ранних спектральных классов, хотя и не исключает возможность использования его для наблюдения, скажем, молодых звёзд, объектов с эмиссионными линиями и динамики звёзд классов G и позднее, где, соответственно, скорее требуются детальность профилей линий, хорошая фотометрическая точность и прецизионная калибровка длины волны до миллиангстрема и лучше, недостижимые с данной конструкцией прибора и используемым детектором.

Читатель, незнакомый с основными принципами конструкции и характеристиками спектрометра “Радуга”, может обратиться за информацией к “Описанию волоконного эшелеле-спектрографа Радуга” (А.Токовинин, ГАИШ, 1998, файл `descr.ps`).

Обработка данных спектрографа реализована в виде набора процедур в среде ESO-MIDAS, объединённых с так называемый контекст *raduga*. Большинство из операций над данными заимствовано из контекстов *echelle* для обработки щелевых эшелельных спектров и *spec* для работы над спектрами любого происхождения. Что такое контекст, как работать в MIDAS'e — об этом читателю рекомендуется почитать в руководстве по работе с этой системой (MIDAS User Manual, Volume A). Описание контекста *echelle* дано в Volume B, Chapter 7 “Echelle Spectra” руководства, где дана основная необходимая информация для понимания основ обработки эшелеле-спектрограмм и общая её идеология. Контекст *raduga* написан Н. Шатским при участии О. Возяковой и М. Смехова (ГАИШ).

Отличие волоконного спектрографа от обычного щелевого состоит в малой ширине порядков и в том, что их положение на ПЗС-снимках не зависит от положения звезды на входной апертуре (входном торце волокна, играющем роль щели), что позволяет использовать более эффективную процедуру массовой обработки данных ночи, чем с предлагается в контексте *echelle*. Кроме того, контекст *raduga* непосредственно обрабатывает сырые ПЗС-кадры, то есть не требует внешней подготовительной работы над данными, и представляет эффективные средства для автоматизированной пакетной обработки данных целой наблюдательной ночи. Наконец, стандартные средства MIDAS не предоставляют эффективной

процедуры т.н. *оптимальной экстракции* спектра, то есть взвешенного суммирования интенсивностей пикселей в направлении, перпендикулярном дисперсии, для получения максимального отношения “сигнал/шум” и эффективного обнаружения космических частиц. Эти и некоторые другие обстоятельства и послужили мотивацией для создания своей процедуры обработки данных “Радуги”.

В документе рассмотрена версия nov05 контекста `raduga`. В главе 1 рассмотрены принципиальные вопросы редукции и упрощённая её схема, в главе 2 изложены детали реализации и особенности применяемых приёмов в связи с конкретными свойствами спектрографа. Глава 3 предлагает описание типовой редукции данных наблюдательного сета. Заключительная глава 4 посвящена кросс-корреляционной обработке спектров с целью определения лучевых скоростей звёзд.

# Глава 1

## Общее описание методики редукиции

### 1.1 Типы данных и организация последовательности редукиции

Редукиция данных проводится отдельно над каждым набором ПЗС-изображений калибровочных и звёздных спектров, полученных в одну ночь. Некоторые операции проводятся над совокупностью данных, полученных в течение всего *сета* наблюдений, то есть относительно короткого периода времени (до 1-2 месяцев), в течение которого установленный спектрометр не перенастраивали в промежутках между наблюдательными ночами. К последним относится назначение некоторого опорного спектра лампы с линейчатым спектром с соответствующей калибровкой длин волн, относительно которого ищется уточнённый полином дисперсионного соотношения  $\lambda = F(x, m)/m$  для каждого спектра лампы с полым катодом; усреднение порядков т.н. баланс-спектров (плоских полей для коррекции интенсивностей порядков за суммарную неравномерность чувствительности колонок ПЗС в них), усреднение нормированных изображений спектров лампы накаливания (для оптимальной экстракции) и профилей порядков (функции блеска эшеле, используемой для выравнивания профилей порядков выходных спектров).

Данные для редукиции разделяются на 4 основных типа:

**BIAS** – изображения с нулевой экспозицией, используемые для вычитания “подложки” из кадров других типов;

**LN** – изображения спектров лампы накаливания, полученные для определения положения порядков эшеле, которое надо знать для т.н. экстракции (суммирование отсчётов в одной длине волны, т.е. вдоль “цели”, в данном порядке) спектров этого и других типов. Также, экстрагированные спектры LN используются для получения порядков т.н. баланс-спектров, на которые делят порядки спектров объекта, чтобы “выровнять” их чувствительность и избавиться от систематических ошибок в интенсивностях с высокой частотой

**LPK** – спектры лампы с полым катодом (линейчатым спектром), линии которых автоматически отождествляются в экстрагированных порядках с целью построения дисперсионного соотношения для калибровки по длинам волн;

**OBJ** – спектры звёзд, в том числе и звёзд – спектрофотометрических стандартов. Порядки последних сшиваются и результирующий спектр сравнивается с табличным распределением энергии в спектре путём деления на него. Результат деления сглаживается и

используется затем для коррекции всех звёздных (сшитых) спектров с целью получения реалистичного распределения энергии в них.

Кроме перечисленных основных типов изображений, существуют и несколько реже встречающихся (необязательных) типов:

**DARK** – изображения с длительной экспозицией без подачи света, используемые для изучения темнового тока приёмника (в настоящее время в контексте не учитывается);

**FLAT** – изображения, полученные прямой засветкой ПЗС источником света перед объективом камеры спектрографа для изучения эффектов неоднородности чувствительности по полю (в настоящее время этот метод коррекции не используется);

**LN2** – изображения спектров лампы накаливания, полученные для определения положения порядков эшеле от дополнительного оптического волокна (используемого для одновременной регистрации спектра неба или опорного линейчатого спектра во время экспозиции объекта).

**LPK2** – спектры лампы с полым катодом (линейчатым спектром), полученные с дополнительным волокном для одновременной калибровки спектров во время экспозиции объекта (на настоящее время методика не разработана в силу методических трудностей).

**OBJ2** – спектры неба через дополнительное волокно (используется редко в случае сильной засветки неба при длительных экспозициях).

Из этого перечня очевидно, что одно ПЗС-изображение может иногда содержать эшеле-спектры от обоих волокон и, таким образом, представлять данные сразу двух типов – например **OBJ + OBJ2** или **OBJ + LPK2**. Такие спектры обрабатываются в два приёма, как изображения первого и затем второго типа.

В отличие от подхода к редукции в контексте *echelle*, пользователь не решает в процессе работы, к какому типу данных относится текущий спектр и какие процедуры к нему применять. Все спектры обрабатываются при помощи одной главной процедуры `raduga_pipe.prg` (т.е. “труба”), запускаемой командой `PIPE/RADUGA`. “Труба” открывает файл спектра, имя которого даётся как параметр запуска, и на основе значений параметров (дескрипторов) в его FITS-заголовке решает, какие операции к нему применить. В случае калибровочных данных, в результате работы “трубы” в рабочей директории создаются такие файлы, как `BIAS.bdf` (вычитаемая подложка), `order.tbl`, `back.tbl` и `line.tbl` (таблицы положения порядков, промежуточных точек для вычисления значений фона и результатов калибровки по длинам волн) и др., используемые при редукции кадров объектов при последующих запусках “трубы”. Таким образом, на вход “трубы” поступают сырые изображения, а на выходе получают готовые спектры или калибровочные данные.

Этот подход (использование текущих калибровочных данных в виде файлов с фиксированными именами в рабочей директории) заставляет так организовать последовательность запусков “трубы”, чтобы при редукции спектров звёзд были использованы калибровки с наименьшими ожидаемыми ошибками из-за переменности характеристик спектрометра во времени. Эта последовательность обработки выстраивается процедурой `pipemaster.prg`, запускаемой командой `REDUCE/RADUGA` с параметром – именем таблицы журнала наблюдений обрабатываемой ночи, обычно сохраняемой в FITS-формате вместе со спектрами в той же директории на носителе (обычно компакт-диске). Принцип её работы — найти для



каждого спектра объекта такие калибровочные снимки, модуль разности времени экспозиции которых со спектром звезды минимален. Найденная последовательность записывается в список (каталог) изображений `pipe.cat`. Далее с этой последовательностью кадров может запускаться “труба” для выполнения самой редукции.

Таким образом, команда `REDUCE/RADUGA` помогает автоматизировать обработку данных одной ночи наблюдений, сведя её к подаче одной команды для редукции всей совокупности. Вся методика обработки выражена в схеме “трубы”, которую мы и рассмотрим ниже.

## 1.2 Обработка изображений различных типов в “трубе”

На Рис. 1.1 схематично изображена блок-схема обработки данных “трубой”. Четыре ветви отвечают за процессы обработки данных четырёх основных типов, представленных выше. Тип данных определяется по параметру (дескриптору) `OBJECT` или `IMAGETYPE` из заголовка FITS-файла обрабатываемого изображения. В дальнейшем по этому типу запускаются необходимые этапы редукции в форме вызова внешних процедур контекста *raduga* или команд контекста *echelle*. Следует заметить, что, кроме названия объекта `OBJECT`, тип спектра также зашифрован в специальном параметре `RDG_MODE` (это режим адаптера спектрографа, см. Описание спектрографа “Радуга”), однако этот параметр разбирается только в процедуре `pipemaster.prg`. Сложные случаи двух-волоконного режима работы решаются принудительным назначением типа изображения в виде параметра `IMTYPE` запуска `PIPE/RADU`, что используется при разборе `RDG_MODE` в `pipemaster.prg`. Наконец, следует заметить, что обработка изображений типов `LN2`, `LPK2` и `OBJ2` ведётся аналогично типам `LN`, `LPK` и `OBJ`.

## 1.3 Обработка кадров подложки

Кадры подложки имеют одномерную структуру и поэтому, для снижения шумов, их строки усредняются и затем множатся для получения исходного формата кадра в файл `BIAS.bdf`, пригодный для вычитания из других. В процессе усреднения вычисляется и среднеквадратичное отклонение значений в столбцах от их среднего, которое является оценкой текущей величины шума считывания в единицах преобразования `ADU` и присваивается ключевому слову `RON` контекста *echelle*.

## 1.4 Обработка спектров ЛН

Изображения непрерывного спектра лампы накаливания (ЛН или `LN`), с вычтенным кадром подложки, поступают на вход процедуры `DEFINE/HOUGH` контекста *echelle*, которая автоматически выделяет заданное в ключевом слове `NBORDI` число порядков спектра в пределах номеров строк ПЗС, заданных в 2-элементном ключевом слове `SCAN`. Выделение идёт в центральной части спектра, в пределах которой кривизна порядков (выделяемых преобразованием `Hough` как прямолинейные структуры) кривизна порядков незначительна.

Обнаруженные порядки выражаются точками с координатами `ORIG` и `SLOPE` в пространстве преобразования `Hough`, которые затем прослеживаются от центра к краям кадра ЛН методом порогового детектирования (этап `DEFINE/HOUGH`, который можно вызвать отдельно, задав этой процедуре параметр `P4=FOLLOW`). Найденные с шагом по  $X$  в 10 пикселей точки на вершинах порядков аппроксимируются двумерным полиномом 2-й степе-

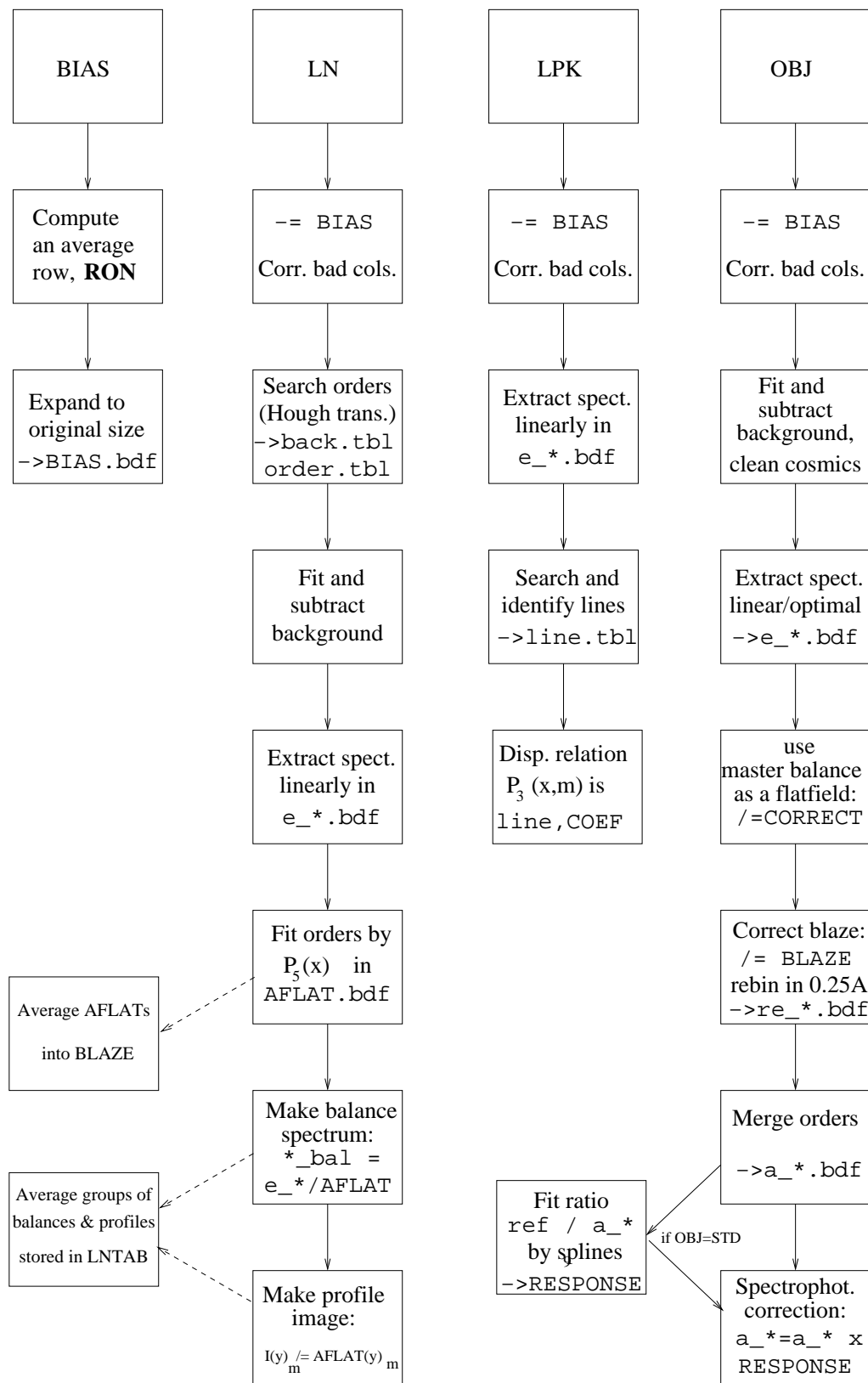


Рис. 1.1: Общая схема редукии данных спектрографа “Радуга”. Машинным шрифтом даны фиксированные имена файлов калибровочных данных или (если присутствует звёздочка) – правило образования имён файлов результатов редукии, в которых роль “\*” играет имя текущего обрабатываемого изображения.

ни по  $X$  и 4-й степени по относительному номеру порядка  $m$ . Результаты прослеживания и аппроксимации порядков сохраняются в таблице `order.tbl`, коэффициенты полинома-аппроксиманты – в дескрипторах `COEFF*` этой таблицы, а сетка точек, находящихся посередине между соседними порядками и служащих для определения величины меж-порядкового фона – в таблице `back.tbl`. Все эти этапы выполняются в рамках работы команды `DEFINE/HOUGH`.

Перед экстракцией спектра командой `BACKGROUND/ECHE` или `FILTER/ECHE` вычисляются значения фона в пикселях, занимаемых спектральными порядками. Фон определяется как гладкая поверхность на основе аппроксимации сплайнами значений между порядками, взятых в точках, данных в таблице `back.tbl`. Кроме определения фона, команда `FILTER/ECHE` также находит и частично устраняет следы попадания космических частиц в порядки спектра.

Далее спектр лампы накаливания экстрагируется (`EXTRACT/ECHE`) путём суммирования интенсивностей колонок изображения спектра в пределах полосы с шириной, задаваемой ключевым словом `SLIT`. Полоса центрирована на  $Y$ -координату середины порядка, вычисленную по найденной ранее аппроксимации порядков полиномом. При этом на краях полосы берутся дробные части отсчётов, соответствующие дробной части  $Y$ -координаты середины, что позволяет избежать “ступенек” в результатах экстракции ярких спектров. Экстрагированный спектр получает имя исходного изображения с суффиксом `e_` и имеет размерность исходного кадра по  $X$  и `NBORDI` строк (порядка 1050 на 23).

Результаты экстракции спектра лампы накаливания отражают форму порядка, определяемую функцией блеска эшеле (`blaze-function`) и виньетированием порядков с краёв. На эти гладкие “одногорбые” профили наложены высокочастотные колебания. Эта “гребёнка” складывается из суммарного эффекта неравномерной чувствительности пикселей, принимавших участие в экстракции, статистического шума и шума считывания.

С целью разделения формы порядка и высокочастотной компоненты, порядки спектра ЛН аппроксимируются полиномами 5-й степени от  $X$ . Эти аппроксиманты сохраняются в изображении `AFLAT.bdf`, отражающем форму порядков и свободном от шумов, и сохраняются также с именем файла и суффиксом `_AFLAT`. В последующем, все `*_AFLAT`-кадры сета усредняются для получения мастер-функции блеска `BLAZE`, используемой для коррекции спектров объектов. Результаты деления экстрагированного спектра ЛН на `AFLAT` (имеющие суффикс `_bal`) имеют примерно плоский профиль с интенсивностью около единицы и могут использоваться как “плоское поле” для коррекции неравномерности чувствительности ПЗС в экстрагированных спектрах объектов. Однако статистический шум и шум считывания составляют значительную долю переменности этих т.н. “баланс-спектров”, что значительно понижало бы отношение “сигнал/шум” в результатах такой коррекции с сомнительным выигрышем по части избавления от систематических ошибок.

Поэтому как таковые “баланс-спектры” не используются, а усредняются большими группами (не менее 7-9 штук), при условии, что положение порядков между ними совпадает с точностью не хуже 0.05–0.1 пикселя на всей площади спектра. Это делается после первой редукции данных всего сета наблюдений, которая касается лишь кадров подложки и опорных спектров (ЛН и ЛПК). Такая предварительная редукция имеет целью изучить стабильность калибровок в течение сета и выделить группы ночей с общим положением порядков, если зафиксированы “скачки” калибровки. Баланс-спектры внутри этих групп усредняются (с отсевом выбросов) и служат далее для коррекции неравномерности чувствительности ПЗС в спектрах звёзд основной редукции. Границы групп ночей и соответствующие им “мастер-балансы” сохраняются в таблице, имя файла которой известно “трубе” как значение ключевого слова `LNTAB` контекста *raduga*.

Кроме баланс-спектра, результатом обработки спектра ЛН является и изображение про-

филей порядков эшеле, которое, по сути, есть исходный спектр (без фона и косм. частиц), в котором каждое  $Y$ -сечение каждого порядка поделено на соответствующее значение полученного до этого AFLAT (очевидно, что баланс-спектры есть результат экстракции этих профилей). Эти нормированные профили усредняются в пределах тех же больших групп, что и баланс-спектры, и используются для оптимальной экстракции спектров звёзд.

## 1.5 Обработка спектров ЛПК

Начинается, как обычно, с вычитания кадра подложки `BIAS.bdf`. Затем спектр экстрагируется (фон не играет роли и поэтому не вычитается) и в нем производится поиск эмиссионных линий согласно критерию `THRES2`, отражающему пороговую интенсивность результата свёртки порядка спектра с гауссианой с шириной `WIDTH2`. Эти два ключевых слова контекста *echelle* управляют чувствительностью процедуры `SEARCH/ECHE` к слабым линиям ЛПК, что важно ввиду их общей малочисленности. Оптимально находятся около 700 линий, это количество несколько больше максимально возможного числа каталожных линий в (перекрывающихся по длине волны) порядках регистрируемого спектра, но ещё не содержит существенного “мусорного” фона.

Найденные линии отождествляются итеративно в ходе уточнения дисперсионного соотношения  $\lambda = F(x, m)/m$ , являющегося полиномом 3-й или 4-й степени по обеим переменным. Стартовое соотношение устанавливается либо опорной калибровкой, если используется метод `GUESS`, либо ручным отождествлением двух линий в красной и синей областях спектра, каждой в двух соседних порядках, если используется интерактивный метод `PAIR` (в случае неудачи метода `GUESS` с опорой на калибровку предыдущего сета или отсутствия таковой). Команда `SAVE/ECHE rdg_srvoldcalibr` сохраняет удачную калибровку в служебной директории `srv/` контекста *raduga* в качестве опорной.

Результаты калибровки считаются удовлетворительными, если итеративно отождествлено не менее 500 линий и среднее отклонение линий от ожидаемых дисперсионным соотношением положений не превышает  $50m\text{Å}$ . Они сохраняются в таблице `line.tbl`, причём коэффициенты дисперсионного полинома записаны в дескрипторах с префиксами `COEF`. (Заметим, что полином положения порядков скопирован в эту же таблицу из `order.tbl` в виде дескрипторов с префиксами `COEFF`).

## 1.6 Обработка спектров объектов и стандартов спектрофотометрии

Ход обработки звёздных спектров напоминает процесс обработки ЛН, но не содержит этапа поиска положения порядков. Вычитание подложки, моделирование и вычитание фона, экстракция спектра делаются тем же способом. При этом возможно использование метода оптимальной экстракции с детектированием космических частиц вместо фильтрации `CR` командой `FILTER/ECHE` и линейной экстракции. Далее, однако, процесс отличается от описанного выше.

Для коррекции неравномерности чувствительности колонок ПЗС в пределах полосы экстракции используется наиболее подходящий мастер баланс-спектр, взятый согласно таблице `LNTAB`. Этот коррекционный кадр используется для деления экстрагированного и не меняет истинного масштаба сигнала в нем, так как содержит величины порядка единицы.

Далее порядки спектра интерполируются на равномерную сетку с фиксированным шагом, равным средней ширине пикселя ПЗС в единицах длин волн (принято  $0.25 \text{ Å}$ ), с по-

мощью команды REBIN/ECHE. Чтобы сигнал в порядке был примерно одного уровня континуума, профиль блеска решётки из него ликвидируется делением на кадр BLAZE. В результате сохраняется лишь общий наклон, образованный разностью градиентов спектров лампы накаливания и континуума звезды в данной области. Получившийся спектр имеет имя с префиксом `re_` и другую размерность по  $X$ , при этом привязка длин волн начал порядков и число действительных данных в них сохранены в дескрипторах WSTART и NPTOT, каждый из которых имеет столько элементов, сколько порядков содержит кадр (т.е. NBORDI штук).

Порядки на равномерной сетке в файлах `re_*` сшиваются в выходной “классический” спектр в виде 1-мерного изображения `a_*` с помощью команды MERGE/ECHE. Поскольку спектр лампы накаливания не плоский, этот спектр имеет характерно “проваленную” середину, если спектр самой звезды монотонный (ранние спектральные классы).

На этом этапе делается оценка отношения “сигнал/шум” в области 5540–5640 Å, где звёзды ранних спектральных классов не имеют выраженных линий поглощения. Эти оценки сохраняются в дескрипторах SNR5590 выходных файлов и помогают оценить качество редукиции выбранным методом и дать общую оценку результату.

Получить реалистичное соотношение интенсивностей разных частей спектра помогает процедура спектрофотометрической коррекции. Она заключается в умножении сшитого спектра на гладкую кривую обратной спектральной реакции системы, которая определяется по спектрам звёзд-стандартов спектрофотометрии.

В отличие от контекста *echelle*, кривая реакции определяется не в пространстве порядков (где учитывает и функцию блеска эшелле и спектральную реакцию одновременно), а уже на шкале длин волн сшитого спектра. Это связано с тем, что разрешение имеющихся в распоряжения калибровочных спектров звёзд-стандартов (например, Альфы Лиры, Орла, Пегаса, Большой Медведицы) составляет 50 ангстрем, что недостаточно для воспроизведения формы спектра в районе линий бальмеровской серии, которые покрывают до половины ширины своих порядков. Поэтому вместо коррекции общей чувствительности системы до этапа шивки используется деление на профиль порядков по данным ЛН, шивка, и затем уже коррекция результата.

Результат деления полученного спектра стандарта (интегрированного на сетку каталожного калиброванного спектра) на калибровочный спектр сглаживается подгонкой сплайнов 2-го порядка с выбранной степенью сглаживания. Подгонка выполняется во всей спектральной области за исключением длин волн 6830-6980 Å, где расположены интенсивные полосы теллурических линий. Из-за большого количества точек и отсутствия “пробелов” такая аппроксиманта ведёт себя устойчиво и хорошо воспроизводит одногорбую кривую реакции системы, несущую и спектр лампы накаливания, использованный при наблюдении звезды-стандарта.

## Глава 2

# Детали реализации алгоритмов редукции данных

В данном разделе мы представляем соображения, по которым были выбраны те или иные методы или параметры редукции спектральных данных. Конкретный выбор основан на свойствах используемого в настоящее время детектора (камера S1000 на основе 1050x1140 кристалла ленинградского завода “Электрон”) и оптики камеры спектрографа и при переходе на другую электронику считывания (с настоящего контроллера Лаборатории ПЗС САО РАН), детектор и оптику может слегка измениться. Однако набор методов обработки данных и вычислений характеристик результатов, скорее всего, останется прежним в силу своей общности и гибкости. Он разработан на основе опыта редукции данных наблюдений в сентябре 2004 года на 1.25м телескопе Крымской станции ГАИШ (Н. Шатский, И. Антонин, И. Волков, А. Кравцова). Раздел написан на основе материалов рабочей тетради N12 (стр.1–75).

Приведённый материал поможет понять мотивацию введения некоторых переменных, условных структур и других особенностей кода процедуры `raduga_pipe.prg`, которая является основным носителем алгоритма первичной редукции спектров. В частности, для многих ключевых калибровочных процедур приведены верификации, т.е. проверка допустимости количественных характеристик калибровок, например, разброса точек вокруг аппроксиманты. Эти проверки не допускают случаев непреднамеренного использования негодных калибровочных данных при пакетной обработке результатов ночи.

### 2.1 Характер переменности кадров подложки и их обработка

Кадры подложки с используемой камеры S1000 имеют характерную одномерную структуру, то есть имеют один систематически повторяющийся профиль во всех строках, отражающий, по-видимому, колебания напряжения в считывающей электронике при обработке регистра строки (Рис. 2.1). Колебания уровня достигают 15 ADU, а выбросы имеют полный разброс до 40 ADU. Наблюдаются особенности на отсчётах  $X$  около 256, 512, что говорит о недостаточной стабильности питания схем считывающей электроники, зависящей от потреблений счётчиков. Однако все эти особенности достаточно строго воспроизводятся от строки к строке, что мотивирует их усреднение при вычислении текущего мастер-BIAS для снижения шумов, реализованное в процедуре `raduga_make1Dbias.prg`.

При вычислении среднего профиля подложки (средней строки) необходимо устранить возможное влияние следов космических частиц, зарегистрированных в течение 74-секундного

считывания выбранных 900 рабочих строк матрицы, а также отдельных дефектных пикселей. Поэтому отсчёт в каждом элементе усреднённой строки подложки вычисляется после сортировки значений в текущем столбце и отсева крайних 5% отсчётов как с верхней так и с нижней границы их распределения. Статистика оставшихся пикселей используется для вычисления среднего.

Результат вычитания полученного кадра размноженной средней строки из исходного используется для оценки шума считывания (записываемого позже в ключевое слово **RON**) как минимальное значение  $\text{rms}$  указанной разности в нескольких выделенных малых областях всего поля кадра.

На средний уровень подложки и величину **RON** в PIPE/RADU наложено ограничение: медианный уровень должен быть в пределах  $\text{RDG\_BIAS}(1) \dots \text{RDG\_BIAS}(2)$  ADU (1100–1300), а **RON** – в пределах  $\text{RDG\_BIAS}(1) \dots \text{RDG\_BIAS}(2)$  ADU (10–30).

Статистика переменной профиля подложки во времени исследовалась с целью выяснения требуемой периодичности регистрации кадра подложки и величины погрешностей, вносимых этой переменной в сигнал. Для этого брались средние строки подложек `c49??_1D.bdf`, зарегистрированных в течение тестового сета наблюдений (09.2004), и рассматривалась статистика их разности как функция времени. Для удобства этого в скрипт `raduga_make1Dbias.prg` была добавлена запись дробного UT-часа регистрации подложки (из дескриптора `0_TIME(5)`) в последний пиксель строки (не содержащий информации, т.к. это область оверскана). Для упрощения исследования статистики переменной написан скрипт `biasvar.prg`. В результате изучения всех 13 ночей сета были сделаны следующие выводы:

1. Максимальное отклонение профиля от профиля в течение ночи обычно составляет около 1 ADU по форме и 2 ADU по общему уровню. Среднеквадратичное отклонение имеет величину около 1/4 ADU. Статистика не учитывает “нехорошие” места в начале регистра, описанные ниже.
2. В случае проблем со считывающей электроникой контроллера ПЗС характеристики переменной (максимальное и среднеквадратичное отклонения, переменность общего уровня) увеличиваются примерно в 1.5 раза по отношению к указанным выше.
3. Имеется пара мест на профиле подложки, где его “скачок” перемещается со временем вдоль оси  $X$  в пределах нескольких пикселей. Основной такой блуждающий скачок расположен на  $X=85..95$  и его перемещение вызывает неопределённость уровня до 3–4 ADU в этом месте. Перемещение может произойти в среднем 1 раз в ночь, а может и не произойти. Кроме того, 1 раз зафиксирован период времени, когда “пики” профиля были пониженной в 2–3 раза величины при той же гладкой форме профиля.
4. Отклонения от времени зависят слабо, однако вычитание подложки, полученной в пределах часа к корректируемому кадру, может на 20–40% уменьшить погрешность. Однако, с учётом малости этой погрешности (1/4 ADU по сравнению с 5 ADU шума считывания) выигрыш незначим. Гораздо важнее часовая частота по причине опасности перемещения скачка уровня в районе  $X=90$ .

Проверка справедливости 1-мерной модели подложки проводилась при помощи групп кадров подложки, зарегистрированных подряд в начале ночи (обычно 4 штуки). Требовалось выяснить, какое качество коррекции профиля подложки получается вычитанием

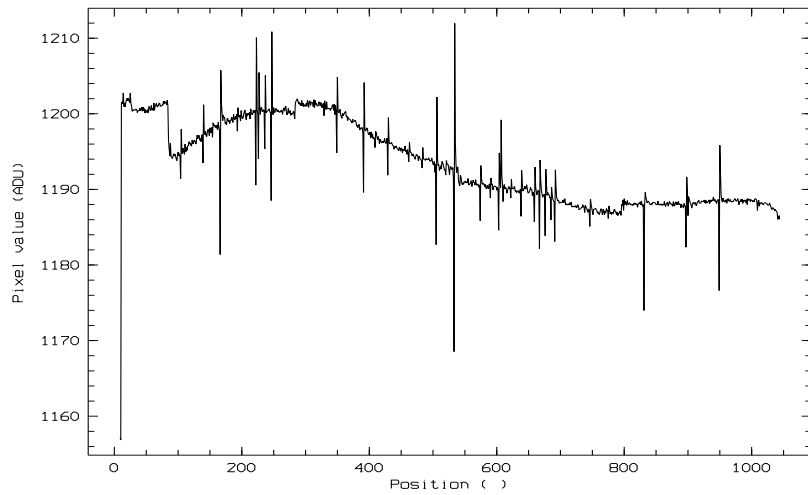


Рис. 2.1: X-разрез кадра подложки ПЗС-камеры CAO РАН (усреднённая строка). Профиль и пики систематически воспроизводятся от кадра к кадру.



Рис. 2.2: Среднее изображение подложки ПЗС-камеры S1000 CAO РАН. Кадр усреднён из 13 групп подложек, усреднённых с отбросом выпадающих значений. Видны около 30 горячих пикселей и их групп.



средней по группе подложки и сравнить с вычитанием 1-мерной подложки, созданной `raduga_make1Dbias.prg`.

Подложки были усреднены в группах с отбросом выпадающих за  $\pm 20$  ADU значений и эти средние кадры были вычтены из каждого кадра подложки текущей ночи. Далее исследовалась статистика разностей.

Выяснилось, что, по сравнению с вычитанием 1-мерного представления подложки, остаточные отклонения меньше для вычитания средне-групповой подложки только для индивидуальных подложек той же группы (4 ADU против 5 ADU для 1-мерной стратегии). Попытка использовать средне-групповую подложку начала ночи для коррекции в середине ночи даёт уже 6 ADU. Иными словами, выгоднее 1 раз в час измерять 1 кадр подложки, чем тратить время на их серии в начале ночи (в середине это уже крайне невыгодно по соображениям эффективности).

Для визуальной оценки “одномерности” подложки все 13 средне-групповых подложек были в свою очередь усреднены в 1 кадр `avgbias.bdf`, представленный на рисунке 2.2. Кроме характерной картины “занавески”, описанной выше, видны и дефектные пиксели и их группы, количеством около 30 по всему полю. Их реальная световая чувствительность неясна, в данных изображениях они явно не просматривались и их специальная обработка пока не ведётся. Следует полагать, что, случае попадания на спектральные порядки, они интерпретируются и фильтруются как космические частицы. Список повреждённых пикселей `hots.lst` по данным среднего кадра подложки есть в директории `srv/` контекста `raduga`, где наряду с координатами  $X$  и  $Y$  (относительно 100-й строки, т.е. рабочей области ПЗС) даны их интенсивности  $> 20$  ADU.

## 2.2 Настройка процедуры выделения порядков эшеле

Автоматическое обнаружение, прослеживание и аппроксимация порядков эшеле-спектра в изображениях со спектрографа “Радуга” долго вызывали сложности из-за неустойчивости работы. Процедура `DEFINE/NOUGH` контекста `echelle`, выполняющая эти операции методом преобразования `Nough`, либо находила не то количество порядков, которое требовалось, либо вообще не дорабатывала до конца. Были попытки создания своей процедуры автоматического поиска порядков (М. Смехов, программы `smorderdef*.c`), не доведённые до должного завершения и не документированные. Детальное изучение проблем с стандартной командой `DEFINE/NOUGH` показало, что проблема кроется в частоте и кривизне порядков “Радуги”, особенно в красной области. Порядки, детектируемые как прямолинейные структуры, на самом деле таковыми не являются и поэтому необходимо ограничить поиск прямых центральной полосой в кадре, где кривизна сказывается ещё мало. Это сделано заданием параметра `P4=2,50`, ограничивающим поиск полосой в 100 пикселей со скважностью 1:1.

В зависимости от фокусировки спектрометра, количество резких порядков и границы их абсолютных номеров могут слегка меняться. В настоящее время принято работать над `NBORDI=23` порядками от 56 до 34 (см. `HELP/ECHE ECHORD`). Поскольку в красной области порядки часты и их наклон в центральной области велик, выбор значения ключевого слова `SCAN` особенно важен для его 2-го элемента, отвечающего за красную  $Y$ -границу зоны поиска порядков: незначительное занижение (на 2-3 пикселя) `SCAN(2)` приводит к неустойчивому обнаружению 34-го порядка, в завышение – к попытке выделения 33-го. Однако, хорошо подобранное единожды значение `SCAN` решает все проблемы с определением порядков для всего сета наблюдений.

Выделение порядков для 2-го волокна связано с модификацией `SCAN`, для чего введено новое ключевое слово `RDG_FIB`, в котором 2-й элемент равен  $Y$ -интервалу между порядками

ми от основного и дополнительного волокон, измеренному в красной области (интервал, в принципе, слабо зависит от номера порядка и равен 8 пикселям). Эта модификация сделана автоматической в PIPE/RADU, исходя из наличия “2” в IMTYP-переменной (или параметре вызова) и делается перед обработкой очередного кадра, поступившего в процедуру.

Следует отдельно заметить, что выбранная эффективная ширина щели экстракции спектра SLIT **перезаписывается** этой процедурой, поэтому после вызова DEFINE/HOUGH в скрипте raduga\_pipe ширина щели восстанавливается. Заметьте, что **в случае останова/прерывания работы процедуры определения порядков значение ширины щели может остаться изменённым!**

Прослеживание порядков в сторону краёв кадра идёт до уровня более слабых потоков в порядках, чем заданные критериями контекста *echelle*, с целью более достоверного представления порядков. Эта мера вызвана большой кривизной порядков в “Радуге” и их значительным ослаблением к краю из-за виньетирования. Для этого критерии останова прослеживания были несколько изменены и соответствующие жёстко-кодированные константы в программе necdef.c были откорректированы, что привело к появлению ее изменённой версии rncdef.c. Такое изменение привело к повышению ширины прослеженного порядка от 60–100% в исходной (официальной) версии программы до 90–100% в изменённой и сделало поведение аппроксиманты на краях значительно устойчивей.

Следует заметить, что SCAN играет роль не только в обнаружении, но и в прослеживании порядков. Если устойчивая работа обнаружения достигается при SCAN(2), который меньше максимальной Y-координаты последнего красного порядка на всей ширине кадра (практически – в левой стороне), то прослеживание прерывается и порядок получается недоопределённым. В этом случае возможно искусственно продвинуть границу SCAN(2) (изначально равную, например, 766) перед прослеживанием:

```
SET/ECHЕ SCAN=150,766
DEFINE/HOUGH P4=2,50
SET/ECHЕ SCAN=150,780
DEFINE/HOUGH P4=FOLLOW
```

Этот трюк можно вставить в raduga\_pipe.prg, если необходимо. Альтернативно, можно исключить ограничение границей SCAN в программе necdef.c, чтобы решить эту проблему кардинально.

Прослеженные порядки задаются сеткой точек с интервалом по  $X$  в 10 пикселей, которая аппроксимируется полиномом от  $X$  и относительного номера порядка ( $m=1..23$ ). Перебор значений степеней (ключевое слово DEFPOL) привёл к выбору оптимальных значений в 2 по  $X$  и 4 по  $m$ . В остаточных отклонениях, представленных на Рис. 2.3, все же остаётся некоторая систематика, однако до степеней в 6 по обоим переменным она существенно не ликвидируется. Степень 2 по  $X$  даёт устойчивое поведение формы порядка при аппроксимации краевых значений с большим разбросом  $Y$  из-за слабого сигнала от ЛН в синей области.

Обычно rms отклонений точек порядка от аппроксиманты составляет около 0.1 пикселя. Для контроля качества в PIPE/RADU наложено ограничение на этот разброс – быть не более RDG\_LN, равного 0.5.

И последнее замечание. Обнаружение максимумов в преобразовании Hough, которое делается программой necfindmax.c, выдаёт диагностику ширины FWHM порядков. Эта ширина в нашем случае не имеет отношения к реальности в силу особенностей алгоритма. Более того, при запуске программы с методом High Contrast (соответствует команде

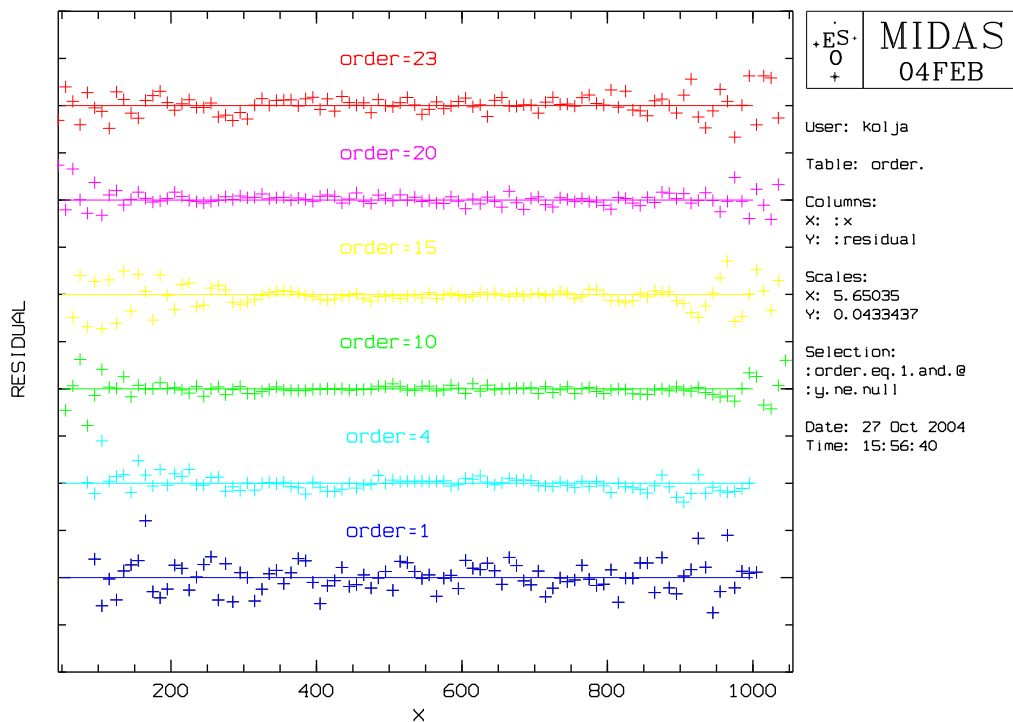
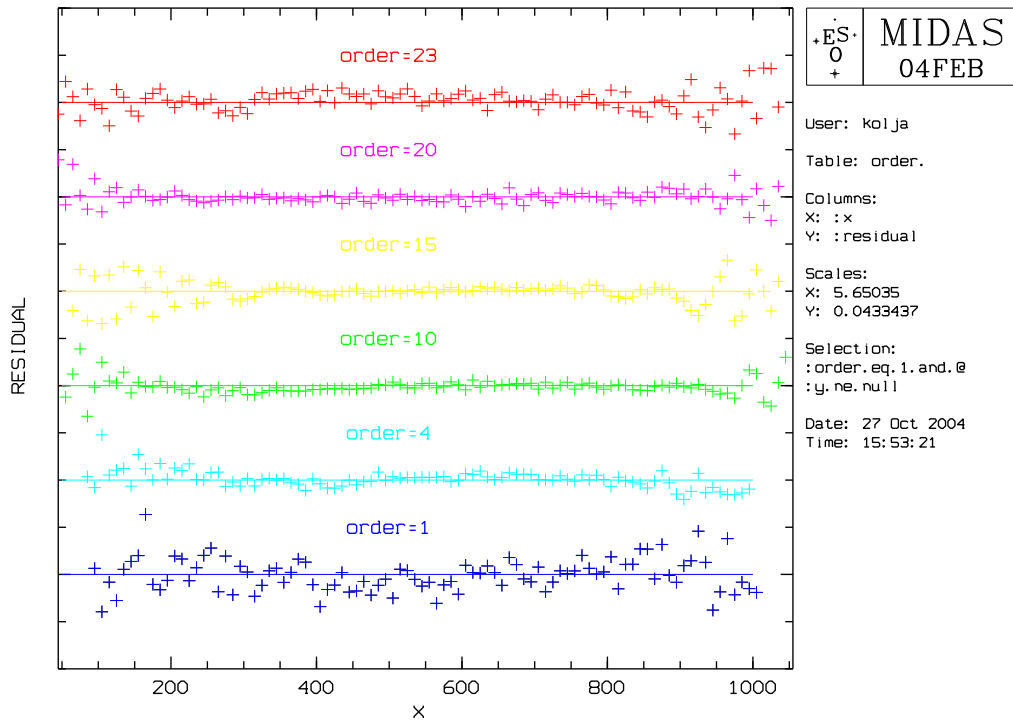


Рис. 2.3: Результаты аппроксимации измеренных положений порядков полиномами  $P_{2,4}(x, m)$  (вверху, принятое решение) и  $P_{4,5}(x, m)$  (внизу, альтернативное решение) для пяти выделенных порядков. Цена одного деления оси ординат – 0.5 пикселя оси Y матрицы. График создан программой `por.prg` Уменьшение систематики при переходе степени по X с 2 на 4 и степени по номеру порядка с 4 на 5 незначительно и повышение степени признано ненужным.

ROUGH/ECHE . . . P5=HNN) ширина определяется индивидуально для каждого порядка только при исправленной ошибке в С-коде, представленном версией `rnecfindmax.c`. Это исправление может сыграть роль только в случае продолжения экспериментов с автоматическим поиском порядков, но не в нынешней ситуации.

## 2.3 Определение плохих колонок ПЗС-матрицы

Дефектные колонки в ПЗС-камере S1000 САО РАН разделяются на два типа – те, которые имеют сильно отличающийся от соседних сигнал на любом типе изображения и те, в которых наблюдаются сильные “потечки”, то есть проблемы с эффективностью переноса заряда, наблюдаемые как смещение сигнала с центра порядков на 1-2 пикселя в направлении считывания. Вторых гораздо больше, чем первых и они не ассоциированы явно с дефектными группами пикселей, как, например, основное дефектное место используемого детектора — колонки 604,605,606.

Дефектные колонки выявлены визуальной инспекцией изображений спектров ЛН и по результатам работы команды `FILTER/ECHE` (см. ниже) на них. Их номера записаны в таблицу `srv/malcolu_all.tbl` (историческое название) в каталоге контекста *raduga*. Эта таблица используется как входная информация для команды `MODIFY/COLUMN`, запускаемой из `PIPE/RADU`. Поскольку дефектные колонки шириной в 3 пикселя этой утилитой вместе не обрабатываются, значения колонки 606 перед этим переписываются значениями колонки 607. В результате на эти три колонки “натягивается” гладкая поверхность с использованием значений в 602,603,607 и 608 колонках. На результирующих спектрах это место сильно не проявляется. Следует добавить, что информация из исправляемых колонок вообще никак не используется, то есть `MODIFY/COLU` запускается с типом колонок ‘V’ (variable).

При работе с данными ПЗС S1000 следует понимать, что количество “плохих” колонок строго не определено: те полтора десятка, что зарегистрированы в `malcolu_all.tbl`, просто имеют наиболее сильно проявляющиеся проблемы с переносом заряда. Однако существует и гораздо больше колонок, где плохой перенос проявляется время от времени и в разной мере. Это особенно важно в связи с решением проблемы оптимальной экстракции спектров, когда смещение светового сечения порядка с ожидаемого места выливается в искажённую оценку суммарного сигнала. Такие временные смещения часто видны как ложные следы космических частиц, выявляемых алгоритмом оптимальной экстракции, и связаны, скорее всего, с нестабильностью управляющей считыванием электроники контроллера ПЗС. Поэтому решение о применении оптимальной экстракции не такое тривиальное, как может показаться на первый взгляд.

## 2.4 Переменность положения и формы порядков эшелле

В силу различных причин порядки на ПЗС-кадрах спектров могут слегка смещаться как в направлении дисперсии (X), так и поперёк неё. Первый вопрос касается стабильности калибровки по длинам волн и рассмотрен в разделе 2.6. Здесь же рассматриваются движения порядков в направлении ординаты (хотя, по сути, это могут быть проявления одного и того же процесса дрейфа механики спектрографа. Одна из досадных причин этого – неослабленные по рассеянности наблюдателей транспортировочные винты-фиксаторы в кожухе спектрографа).

Точность определения ординат положения конкретных сечений порядков методом, использованным в `necdef.c`, недостаточна для исследования дрейфов независимо от аппрок-

симации порядков. Поэтому приходится полагаться на решение вопроса качественного подбора аппроксиманты положения порядков, рассмотренного выше (раздел 2.2).

Их общих соображений мы полагаем, что высшие коэффициенты аппроксимирующего полинома меняются мало и в основном переменным является сдвиг и поворот сетки порядков на ПЗС-кадре. Вопрос переменности именно формы порядков отдельно не исследовался.

Сдвиг порядков в их коротковолновой и длинноволновой частях (левой и правой), а также в центре, вычисляется отдельно процедурой `cororder.prg` и визуализируется сопутствующим скриптом `cororder_plt.prg`. Для вопросов деления на плоское поле и оптимальной экстракции экспериментально и аналитически получены разные значения сдвигов, которые для нас считаются критическими – от 0.05 до 0.15 пикселей по  $Y$ . Приняв компромиссное значение в 0.1 пикселя, весь сет должен быть разделен на группы изображений или ночей, в пределах которых спектры ЛН имеют порядки, попадающие на одни и те же значения  $Y$  с точностью не хуже 0.1 пикселя (т.е.  $\pm 0.05$ ). В тестовом сете сентября 2004 года таких групп набралось 5, включая первые 2 нестабильные ночи в качестве первой группы и выпадающий сдвиг спектра ЛН `c1999.fts` в середине сета в качестве третьей. Эти группы записываются в таблицу `LNTAB` для целей оптимальной экстракции с нужной картиной профилей порядков и деления на подходящее “плоское поле” экстрагированных спектров (см. раздел 3.5).

## 2.5 Экстракция спектра и космические частицы

Экстракция порядков эшелле (суммирование зарегистрированного сигнала вдоль изображения щели спектрографа) в контексте *echelle* предлагается двух типов – линейная и оптимальная. Первая подразделяется на два принципиально идентичных подтипа – `LINEAR` и `AVERAGE`, при этом первый представляет собой простое суммирование потоков в `SLIT` пикселях от  $Y_{cent} - SLIT/2$  до  $Y_{cent} + SLIT/2$  ( $Y_{cent}$  находится из аппроксиманты порядков для каждого  $X$  и  $m$ ), а второй вдобавок и делит результат на `SLIT`.

Из практических соображений в редукции данных “Радуги” из линейных выбрана экстракция типа `LINEAR`. Следует добавить, что в процедуре экстракции предусмотрены ещё и типы `MEDIAN` и `WEIGHTED`, однако первый для нашего случая волоконного спектрографа вообще бессмыслен, а второй упомянут в заголовке, однако даже не рассмотрен (!) в программе экстракции `necexor.for`.

Линейная экстракция складывает интенсивности вдоль щели с равными весами, поэтому существенно накапливает шум и, главное, следы ударов космических частиц. Поэтому перед ней для всех типов изображения, кроме ЛПК и фона неба, производится обработка кадра процедурой `FILTER/ECHE`. Эта процедура усредняет нормированные профили ( $Y$ -разрезы) порядков медианным методом с пределах `CRFILT(1)` отсчётов  $X$  вокруг текущего и сравнивает текущий профиль с полученным ожидаемым медианным. Проблема в случае порядков “Радуги” оказалась в том, что значительный их наклон к оси  $X$  (особенно в красной области на больших  $X$ ) и острота вершин ограничивают пределы усреднения `CRFILT(1)` относительно малым значением порядка 9–11. При больших значениях медианная оценка формы профиля “сплющивается” в районе вершины (это легко себе представить для некоего хребта, секомого прямой  $X$  под острым углом) и каждый конкретный профиль становится острее медианного представления окружающих профилей. В результате в вершинах профилей находятся ложные следы космических частиц и после их коррекции `FILTER/ECHE` систематически недооценивает поток.

В результате пришлось ограничить порог детектирования `CCDFILT(3)` значением в 15

ожидаемых отклонений (из пуассоновской статистики и шума считывания) вместо традиционных 4–6 и, таким образом, сильно снизить эффективность удаления космических частиц процедурой `FILTER/ECHE`. Ограничения наложены исходя из наиболее ярких накопленных спектров с пиковыми интенсивностями порядка 20000 ADU. Они могут, с осторожностью, понижаться для более слабых спектров в индивидуальном порядке ручным присваиванием `CCDFILT(3)` перед их обработкой `PIPE/RADU`. Альтернативно, возможно адаптивное вычисление порога фильтрации по среднему потоку на основе выработанного эмпирического критерия, если его встроить в `raduga_pipe.prg`

**Оптимальная экстракция.** Процедура оптимальной экстракции эшеле-спектров вызывается командой `EXTRACT/OPTI` (или `EXTRACT/ECHE` при значении ключевого слова `EXTMTD=OPTIMAL`) и основана на алгоритме Koji Mukai (1990, Optimal Extraction of Cross-Dispersed Spectra, Pub. of Astr.Soc. of the Pacific, 102, p.183-189) и, в основе своей, на статье Keith Horne (1986, Pub. of Astr.Soc. of the Pacific, 98, p.609-617). Однако, прямо применяемая к спектрам “Радуги”, даёт незначительный выигрыш в отношении сигнал/шум и неправдоподобно большое количество регистрируемых космических частиц (до 2–3 штук на одно сечение порядка, то есть многие десятки тысяч в сумме). Вызвано это тем, что, в силу оптических аберраций в оптике камеры спектрографа и ее хроматизма, форма сечений порядков далеко отличается от предполагаемой в алгоритме гауссианы (обычной модели профиля изображения звезды или его сечения при длительных экспозициях). Явления потечек ещё больше усугубляют картину.

Попытка модификации программы `necopt.for` в сторону (ранее в ней использованной) произвольной формы порядка натолкнулась на проблемы недостаточной определённости получаемого профиля в силу неполноты выборки в методе виртуального бинирования (см. статью К. Mukai). Поэтому модифицированная версия, представленная в файле `gnecopt.for`, кроме коррекции незначительных ошибок оригинала, содержит лишь смягчение критерия выделения космических частиц введением т.н. относительной ошибки профиля `PRFERR` (см. ниже). Однако с тем же значением `PRFERR`, что работает в новой версии оптимальной экстракции `gnecopt2.for`, метод Mukai все равно даёт непозволительно большое число коррекций ложных космических частиц.

Мы разработали альтернативный метод оптимальной экстракции, основанный на внешней модели профилей порядков, нежели на определении их по изображению обрабатываемого спектра. Наш случай волоконного спектрографа позволяет рассчитывать на то, что, в рамках одной группы изображений (раздел 2.4), положение и профили порядков эшеле от лампы накаливания и звезды идентичные. Поэтому для определения весов пикселей вдоль щели при оптимальной экстракции можно напрямую использовать (нормированные) интенсивности изображения ЛН в тех же точках.

Поскольку относительные ошибки профиля (для правильного выбора весов и повышения отношения сигнал/шум по сравнению с линейной экстракцией) должны быть существенно ниже относительных погрешностей в обрабатываемом изображении, для модели профиля надо брать усреднённые изображения спектров ЛН, а не индивидуальные. Усреднение должно *гарантировать* отсутствие следов космических частиц в модели профилей, поэтому перед усреднением с отбросом выпадающих значений индивидуальные спектры нормируются вдоль порядков на свои интегралы. В качестве интегралов профилей берутся результаты экстракции этих же спектров ЛН. Эту работу делает новая процедура `raduga_necprof.prg` и программа `gnecprof.for`. А уже результаты этой по-порядковой нормировки изображений спектров (имеющие интенсивности отсчётов в интервале 0–0.5) усредняются командой `AVERAGE/IMAGE ... av_option=Median,N,M,INDEX`.

Здесь следует сделать замечание. Логично предположить, что истинные изображения профилей порядков спектров ЛН гладкие в направлении дисперсии. Тогда по-порядковая нормировка может делаться не с собственно результатами экстракции спектра ЛН (что можно было бы встроить в саму `necprof.for`), а со сглаженными экстрагированными спектрами порядков. При этом интегралы профилей поперёк порядка в результатах работы программы станут отличаться от тождественной единицы, но, с другой стороны, оптимальная экстракция станет автоматически выполнять и роль деления на плоское поле. В нынешнем варианте `rnecopt2.for` эта опция, однако, выключена повторной нормировкой профилей

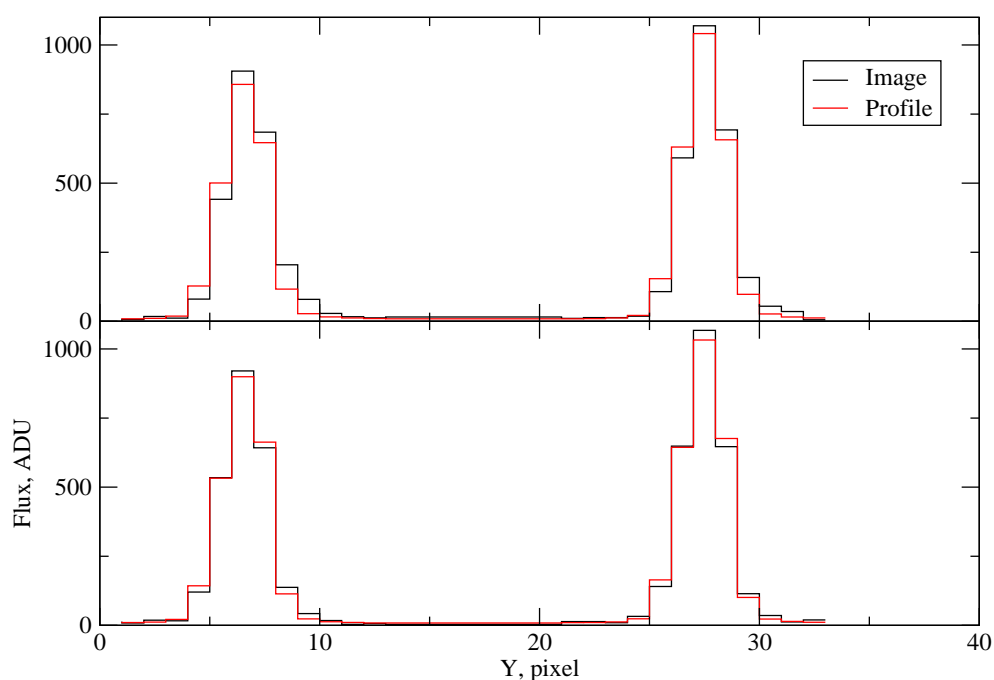
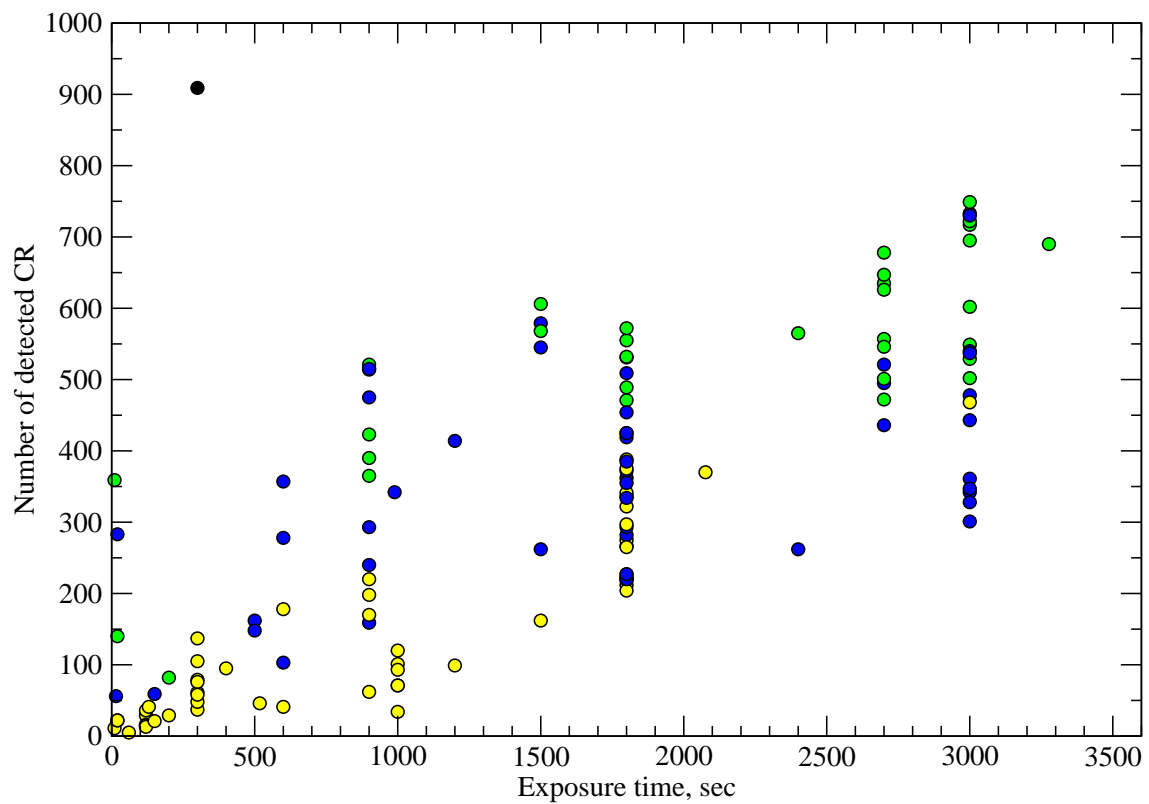


Рис. 2.4: Сдвиг профиля порядка из-за неравной неэффективности переноса заряда в опорном спектре ЛН, дающем модель профиля (красная кривая), и обрабатываемом спектре звезды (чёрная кривая) в столбце с постоянным переносом ( $X=381$ , внизу) и меняющимся ( $X=383$ , вверху). В верхнем случае оптимальная экстракция обнаруживает ложную космическую частицу (график создан на основе тестового вывода программы `rnecopt2.for`).

Сама оптимальная экстракция с выбранным (усреднённым) изображением профилей порядков выполняется принципиально также, как и в оригинальной программе. Опущены лишь запутанные вложенные вызовы процедур для построения аналитического (гауссового) профиля порядков. Кроме того, обнаружение и маскирование космических частиц вынесено из этих процедур в отдельный цикл перед экстракцией. В ней ожидаемая ошибка потока в каждом пикселе (из пуассоновской статистики и шума считывания, как в оригинальной программе) квадратично складывается с ошибкой потока вследствие неточности модели профиля  $\epsilon_f = PRFERR * Flux(x) * Profile(x, y)$ , где  $Flux(x)$  – полученная на предыдущей





итерации оценка интегрального потока в текущем  $x$ .

Из пробных запусков экстракции выяснено, что для эффективного обнаружения космических частиц с небольшим вкладом ложных значение ошибки профиля должно варьировать от 0.05 до 0.1. При этом ложные космические частицы чаще всего регистрируются в колонках с переменной эффективностью переноса заряда, где сдвиг профиля порядка на среднем спектре ЛН отличается от сдвига в обрабатываемом спектре (Рис. 2.4).

В результате сравнения спектров, экстрагированных линейно и оптимально, было выяснено, что оптимальная экстракция даёт выигрыш в отношении сигнал/шум при экстрагированных потоках меньше 500–1000 ADU. На больших потоках она, при наличии значительных проблем с нестабильным переносом заряда, может давать небольшое (несколько процентов) ухудшение S/N.

Поскольку оптимальная экстракция вовсе не панацея в борьбе за максимальную фотометрическую точность выходных спектров, в PIPE/RADU были встроены проверки ее качества и необходимости применения в случае, если она вообще разрешена установкой EXMTD=OPTIMAL. Ключевое слово RDG\_OPT содержит минимальную экспозицию и максимальный сдвиг спектра к профилям порядка (измеряемый на месте и записываемый в выходной оптимально экстрагированный спектр как дескриптор YCORR), при которых разрешено делать оптимальную экстракцию. Если эти условия не выполняются, то принудительно делается линейная экстракция. Более того, если количество выявленных космических частиц выше эмпирически найденного критерия (см. Рис. 2.5)  $N_{cr}(max) = 100 + Texr * 0.5$ , то результаты также признаются негодными и перезаписываются результатами линейной экстракции.

## 2.6 Повышение стабильности и точности калибровки длин волн

Первой задачей повышения надёжности калибровки спектров была оптимизация параметров обнаружения эмиссионных линий лампы с полым катодом (ЛПК) и итеративной процедуры автоматического отождествления этих линий с опорным каталогом при подборе дисперсионного полинома  $\lambda m = P_{DC}(X, m)$ , а также выбор степени этого полинома DC.

С имевшимся каталогом линий было выяснено, что для 10-секундных экспозиций ЛПК оптимален порог детектирования THRES2 в 24 единицы по результатам свёртки экстрагированного спектра (методом LINEAR) с гауссианой (т.е. SEAMTD=GAUSSIAN). Тогда обнаруживается примерно на 20–30% линий больше, чем отождествляется, но при этом почти все линии каталога уже находятся.

Степень полинома DC=3 оптимальна: при ней средний rms остаточных отклонений по порядкам (AVRMS) составляет 0.042Å, а при переходе к степени 4 уменьшается лишь до 0.040Å. При этом все равно наблюдается некоторая систематика среднего отклонения от номера порядка в виде двугорбой кривой (Рис. 2.6).

Эта систематика невелика по амплитуде – максимум 0.02–0.03Å или до 1.5км/с. Она исчезает, если вместо одного двумерного полинома степени DC=3 и по  $X$  и по порядку  $m$  находить независимое решение для каждого порядка, т.е. использовать тип калибровки WLCOPT=1D. Однако в некоторых порядках отождествляется лишь около десятка линий, поэтому ожидаемое отклонение такого решения от истины составило бы  $0.04/\sqrt{10-4} = 0.016\text{Å}$ , т.е. выигрыш сомнителен, а потеря стабильности калибровки в них при незначительном изменении количества и распределения найденных линий по  $X$  весьма вероятна. Поэтому выбран тип калибровки WLCOPT=2D.

Стабильность процедуры калибровки, оцененная как зависимость ее качества (AVRMS) от количества отождествлённых линий Nline, оказалась неплохой: корреляции между этими

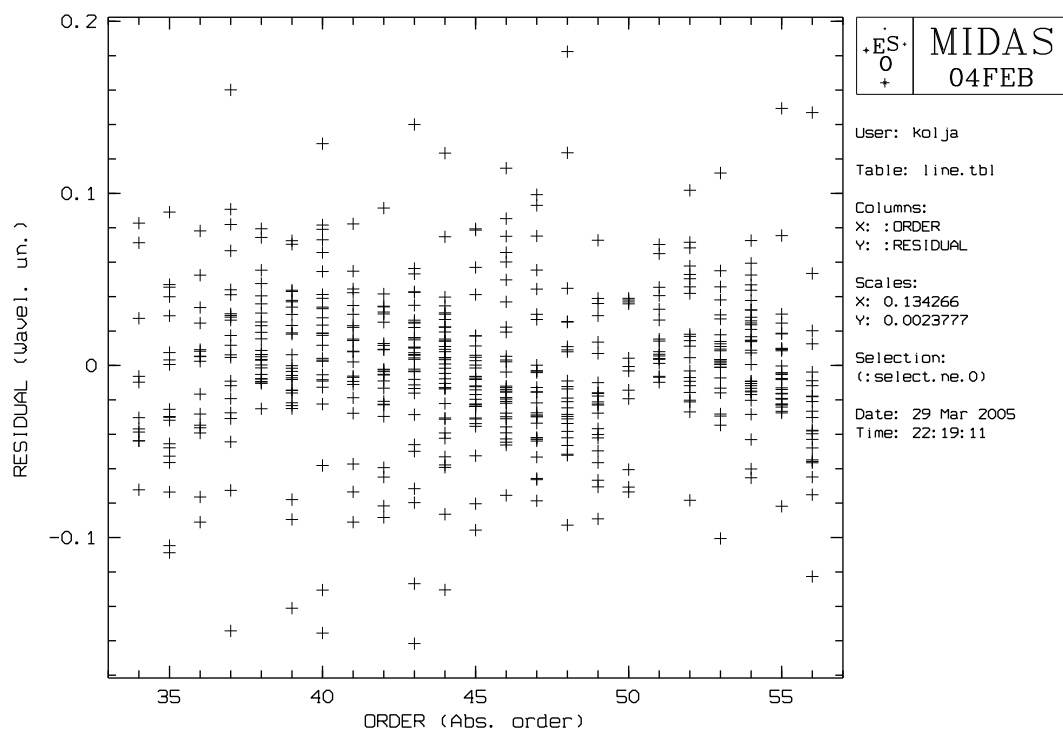


Рис. 2.6: Диаграмма остаточных уклонений калибровки длин волн с выбранным набором параметров отождествления и дисперсионного полинома  $P_{DC}(X, m)$  (создаётся командой PLOT/RESID).

характеристиками не обнаружено. Изучение их статистики по 120 калибровкам сентябрьского сета 2004 года позволило наложить ограничения для приемлемых калибровок:  $N_{\text{line}}$  не менее  $\text{RDG\_LPK}(1) = 500$  и  $\text{AVRMS}$  не более  $\text{RDG\_LPK}(2) = 0.06\text{\AA}$  для конечного варианта каталога линий ЛПК (см. ниже). Как и при других подобных проверках, при нарушении этих требований пакетная обработка ночи останавливается.

Далее мы рассмотрели вопросы: действительно ли все линии опорного каталога уверенно находятся в наших спектрах ЛПК, нет ли в нем бленд, дающих неустойчивые определения положения линий и какие линии систематически дают большие остаточные отклонения и/или отождествляются неверно. Для этого мы исследовали статистику остаточных отклонений линий в 120 таблицах `line.tbl`, полученных при редукции тестового сета.

Выяснилось, что в рабочем диапазоне длин волн 7 каталожных линий вообще не обнаруживаются, а 23 линии либо имеют систематически большие отклонения по  $\text{rms}$  (более  $0.2\text{--}0.4\text{\AA}$ ) или средней величине (более  $0.25\text{\AA}$ ), либо имеют близких соседей, с которыми “делят” вероятность обнаружения. Они были удалены из рабочего каталога ЛПК. Близкие ( $\Delta\lambda < 0.8\text{\AA}$ ) пары линий также входят в эти 23 отброшенные линии.

Далее был поставлен вопрос о переменности формы вычисляемого дисперсионного отношения, вызывающей искажения сетки длин волн на площади приёмника. Эти искажения, скорее всего, не могут быть связаны с реальными гнутиями в оптической системе спектрографа (проявляющимися скорее как смещения сетки длин волн как целого по поверхности ПЗС), а являются следствием нестабильности калибровки ввиду малого числа отождествляемых линий на один порядок эшеле.

Для исследования и количественного описания этого явления был написан скрипт `wl9.prg`, вычисляющий длины волн в узлах сетки 3 на 3, фиксированной на выбранных  $X$ -позициях и номерах порядков. Скрипт обрабатывает набор таблиц `line.tbl`, поступающих на его вход, вычисляя эти 9 длин волн исходя из коэффициентов дисперсионного полинома в дескрипторах `COEFD` таблиц. Представить на графике переменность длин волн на этой выбранной сетке помогает вспомогательный shell-скрипт `wl9.plt.sh`.

В результате изучения “гнутий” сетки длин волн за период сентября 2004г. была получена оценка среднеквадратичного отклонения разности длин волн в ячейках сетки в  $0.007\text{--}0.015\text{\AA}$ , то есть калибровка по полю имеет неопределённость до  $0.5\text{км/с}$ . При этом вся сетка смещается как целое в результате, очевидно, реальной нежёсткости спектрографа, испытываемая отклонения в  $0.1\text{--}0.15\text{\AA}$  за период наблюдений. Таким образом, реальная переменность длин волн на координатной сетке регистрируемых спектров все же превышает неопределённость калибровки. Этим методом попутно подтвердили, что стабильность калибровки по полю, выполненной с 1-мерным типом дисперсионного соотношения ( $\text{WLCOPT}=1\text{D}$ ) в несколько раз хуже, чем с принятым общим 2-мерным решением.

Удаление одной десятой доли рабочих линий из опорного каталога ЛПК привело к незначительному (до 9%) ухудшению стабильности калибровки в синей части спектра и, одновременно, к улучшению стабильности в красной части (до 20%), если судить по результатам `wl9.prg`. Средний разброс  $\text{AVRMS}$  остаточных отклонений по порядкам вырос с  $0.040$  до  $0.042\text{\AA}$ , однако зафиксированные ранее неудачные случаи калибровки с большими (до  $0.05\text{\AA}$ ) разбросами более не выявлялись. Таким образом, чистка каталога линий ситуацию со стабильностью калибровки значительно не изменила; улучшить стабильность можно лишь значительно расширив каталог опорных линий ЛПК.

Каталог длин волн ЛПК, предоставленной Бондаренко (Одесса), содержал изначально 341 линию в диапазоне  $4228\text{--}7725\text{\AA}$ . Попытки найти другие, более полные, каталоги в Интернете не привели к каким-либо существенным пополнениям.

Таблица 2.1: Линии ЛПК, выведенные из опорного каталога. Флаги: М - большое медианное отклонение, п - вероятность обнаружения менее 10%, s - большое среднеквадратичное отклонение

```

# lambda, A Элемент, комментарий
4131.723 ArII не обнаруживается
4250.313 Mn
4251.185 Mn
4369.040 p
4447.720 M
4471.480 sMn
4595.160 p
4621.280 s
4708.220 p
4761.190 Mo не обнаруживается
5015.680 He не обнаруживается
5047.700 sn
5125.130 M
5172.940 p
5234.620 Mn
5280.360 FeI не обнаруживается
5328.040 blend
5619.380 p
5654.120 Mn
5658.540 M
5689.780 Ar+Ar не обнаруживается
5705.980 p
5849.730 S блендируется до бесполезности
6005.140 M
6399.210 Ar не обнаруживается
6409.100 M двойная? resid=+-0.2A
6500.220 SM другая, как правило (-1A)
6678.150 M другая, нестабильная
6960.640 M что за линия???
7065.190 He не обнаруживается

```

Таблица 2.2: Линии ЛПК, введённые в опорный каталог (длины волн в Å).

4190.893 4206.736 4282.443 4315.085 4420.919 4448.871 4491.027 4494.574 4502.929 4528.619  
 4530.561 4626.465 4647.511 4721.590 4752.954 4823.526 4871.381 4942.951 4985.431 5041.732  
 5068.772 5118.204 5125.760 5242.535 5259.031 5305.713 5307.386 5312.060 5332.909 5358.358  
 5389.299 5410.764 5514.343 5554.064 5577.691 5641.372 5658.966 5681.901 5709.364 5783.485  
 5786.547 5812.748 5895.911 5916.584 5949.261 5964.495 5971.602 6005.713 6127.440 6165.131  
 6191.537 6201.079 6254.268 6280.632 6324.390 6332.965 6348.271 6358.664 6431.521 6437.604  
 6441.848 6443.873 6472.434 6513.843 6614.330 6632.081 6677.251 6730.465 6746.223 6818.286  
 6827.265 6851.828 6924.982 6951.407 6992.102 7086.768

Альтернативная методика исследования стабильности калибровки как целого (т.е. реальной механической жёсткости спектрографа) базируется на кросс-корреляции таблиц `line.tbl` с измеренными положениями эмиссионных линий ЛПК с помощью команды `CORRELATE/LINE` (контекст `spec`). Рутинная корреляция всей выбранной совокупности `line`-таблиц с какой-либо опорной делается скриптом `corline.prg` и визуализируется в тренды калибровки в течение исследуемого сета сопутствующей утилитой `corline_plt.prg`.

С помощью такой методики в совокупности 120 таблиц выявленных линий ЛПК были выделены 2 группы, в пределах которых сдвиги положений линий укладываются в 0.04 пикселя по  $X$ . Экстрагированные спектры ЛПК, соответствующие этим таблицам, были усреднены в 2 средних спектра, которые были исследованы на предмет наличия не очень слабых и хорошо выделенных уверенно детектируемых линий, которые не входили в существующий опорный каталог. Вычисленные по дисперсионным полиномам длины волн выбранных “новых” линий были усреднены, статистика отдельных измерений была исследована на предмет опасных отклонений от средних величин. Выброшенные ранее ненадёжные линии в новый каталог, таким образом, не вошли. Так в каталоге опорных линий ЛПК появились 79 новых линий.

В результате описанных экспериментов были сделаны следующие выводы:

- Возможности калибровки с имеющейся ЛПК и ПЗС ограничены качеством приёмника и реальным количеством линий лампы в рабочем диапазоне длин волн. Оптимально решение дисперсионного соотношения 2-мерным полиномом невысокой степени (3 или, альтернативно, 4) на выборке отождествлений с расширенным каталогом опорных длин волн.
- Точность калибровки в смысле среднего разброса остаточных уклонений  $AVRMS$  составляет около  $0.042\text{Å}$ , а временная стабильность формы дисперсионного соотношения характеризуется неопределённостью порядка  $0.005\text{Å}$  в средней зоне и до  $0.010\text{Å}$  на краях (по  $X$  и номеру порядка), что соответствует неопределённости измеряемых лучевых скоростей в 0.3–0.7 км/с.
- Флуктуации формы дисперсионного соотношения позволяют гарантировать отсутствие уклонений длины волны по краям поля ПЗС, соответствующих более 1.7км/с в голубой части и 1.5км/с в красной; в средней части ПЗС (средние 50% ширины порядка) уклонения в 1.5–2 раза меньше.

## 2.7 Проблема плоского поля и профиль функции блеска

**Стратегия учёта “плоского поля”.** Коррекция неравномерной чувствительности приёмника по полю является нетривиальной проблемой в спектральных приложениях. Деление на кадр равномерной засветки здесь тем более неравномерно, поскольку чувствительность приёмника и ее пространственная вариация зависят от длины волны, а приёмник спектра имеет строгую ассоциацию длины волны с конкретными пикселями. Поэтому при редукции классических (эшелле) спектров звёзд с длинной щелью иногда используют нормированный спектр лампы накаливания, полученный равномерной засветкой *всей* щели. На это подготовленное изображение спектра лампы накаливания делят изображение спектра объекта и затем проводят экстракцию. Форма изображения звезды вдоль щели сохраняется.

В случае волоконного спектрографа этот подход не работает: спектр опорной лампы накаливания имеет ту же квази-гауссову форму порядка, поэтому в результате деления на него в крыльях изображения спектра звезды отношение сигнала к шуму стремительно деградирует и экстракция такого результата деления невозможна.

Поэтому приходится проводить экстракцию некорректированного за плоское поле спектра и затем делить результат на экстрагированный спектр лампы накаливания. То есть корректируются уже не индивидуальные отклонения чувствительности пикселей, а их суммарный эффект вдоль изображения “щели” спектрографа (полосы экстракции длиной SLIT).

Однако такой простой подход наталкивается на сложности, если рассмотреть потерю отношения сигнала к шуму в результате такого деления. Спектры лампы накаливания, даже предельно (до границы линейности приёмника) выдержанные в зоне максимальной чувствительности, имеют потоки в 10–20 раз ниже на краях порядков и в синей области, где пропускание системы и распределение энергии в спектре понижены. В результате такого деления коррекция систематических ошибок получается ничтожной, а привнесение случайного (пуассоновского) шума спектра-корректора недопустимо высоко. Как бы хорошо не выдержан был спектр объекта, его среднее значение корректированного S/N не превысит 50–80, а в голубой части – 20–30.

Поэтому для использования экстрагированных спектров ЛН в качестве “плоских полей” их надо усреднять. При этом экстрагированные порядки перед усреднением (с отбросом выпадающих значений) необходимо поделить на их собственный профиль функции блеска эшелле (blaze), поскольку температура лампы меняется и соотношение интенсивностей порядков, соответственно, тоже.

**Определение профиля blaze и вариация чувствительности.** Профиль blaze примерно описывается функцией  $\text{sinc}^2(x)$ , однако любые аналитические модели недопустимо неточны по инструментальным причинам (например, виньетирование на объективе камеры). Поэтому мы подобрали в качестве аппроксиманты профиля блеска полином 5-й степени (Рис. 2.7).

Задачу подгонки профиля  $P_5(x)$  (в контексте называемого “AFLAT”) со статистическими весами к экстрагированным порядкам ЛН выполняет процедура `raduga_flat.prg`. Ошибки краевых 6 точек с обеих сторон искусственно завышены в 10 раз, поскольку здесь процедура `FILTER/ECHE` искажает потоки (6 есть половина значения `CRFILT(1)=11`). В ней же заложены и средства, с которыми мы экспериментировали на предмет адекватности разных аппроксимант (в том числе и аналитических) и вычисления критерия  $\chi^2$  аппроксимации с учётом возможной переменности чувствительности пикселей по полю. В предположении среднеквадратичной вариации чувствительности приёмника в 0.5% по этому критерию наша аппроксимация не имеет систематических отклонений. Независимая оценка этой вари-

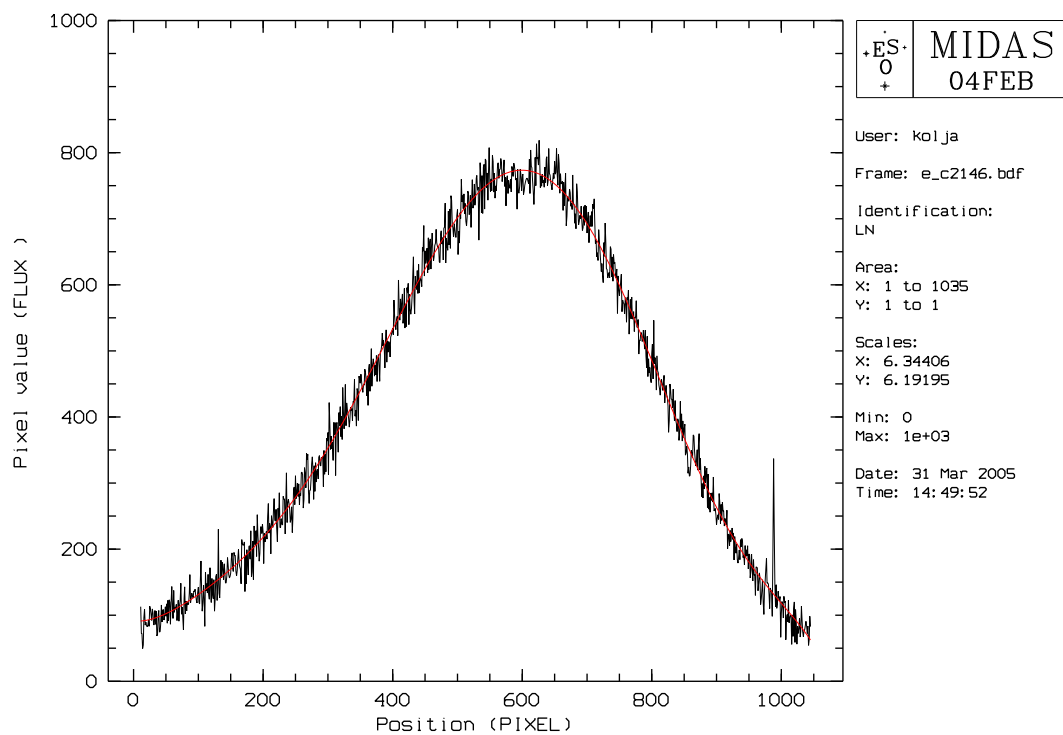
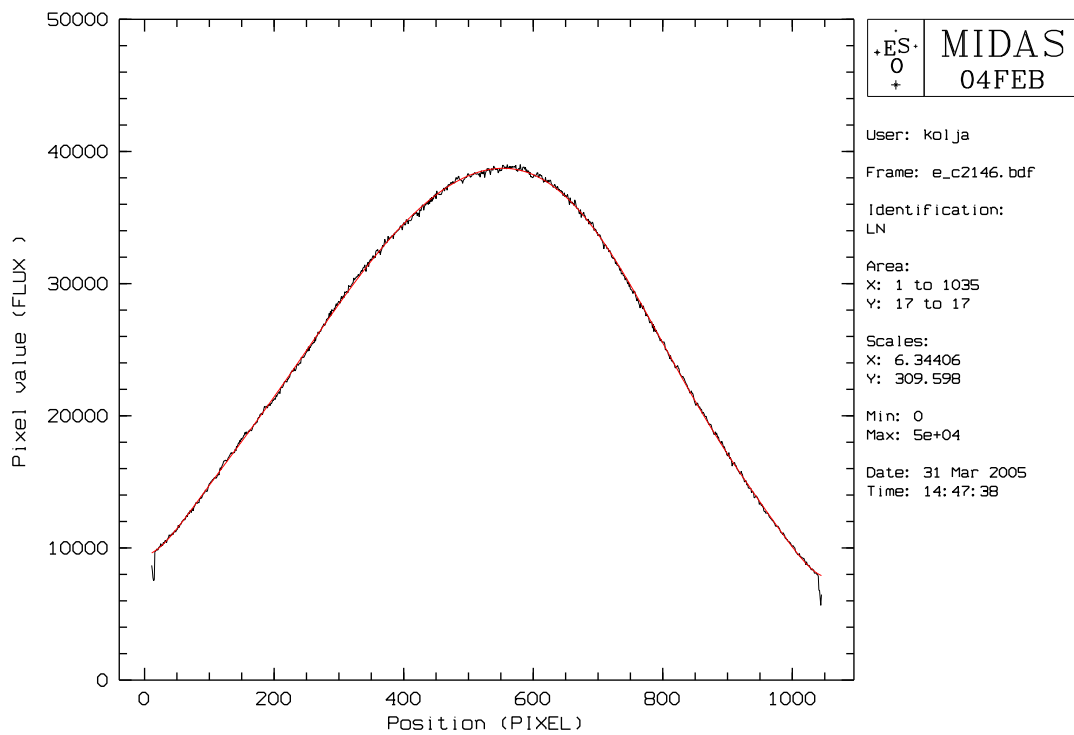


Рис. 2.7: Качество аппроксимации экстрагированных спектров ЛН полиномом 5-й степени с весами. Показаны 17-й (вверху) и 1-й (внизу) порядки, представляющие случаи наивысшего и самого слабого сигнала.

ации получена вычислением отношения сигнал/шум через сглаживание экстрагированных порядков скользящим средним и подбор той вариации, которая давала бы  $\chi^2$  этого альтернативного представления порядка единицы. Таблица отношений сигнал/шум в каждом порядке ЛН в центре и на краях сохраняется с суффиксом `_chi2.tbl` (на настоящее время не учитывает в оценке шума вариацию чувствительности).

Качество аппроксимации экстрагированных порядков спектров ЛН контролируется в PIPE/RADU сравнением результирующего среднего по порядкам  $\chi^2$  с максимально допустимым значением `RDG_AFL`. При отрицательном результате проверки использовать аппроксимированный `AFLAT.bdf` не рекомендуется.

Попытки смоделировать такую зависимость вариации от длины волны (номера порядка), чтобы результирующий  $\chi^2$  (по независимой оценке методом сглаживания) получился порядка единицы привели к следующей модели: вариации чувствительности растут с длиной волны (грубо линейно, точнее определить нельзя), достигая порядка 1.5% в 34-м порядке (6800–7100Å).

**Баланс-спектры и их усредняемость/воспроизводимость.** В результате деления экстрагированных порядков ЛН на их профили блеска (AFLAT) их средний поток выравнивается к значению около 1. Такие спектры (файлы с суффиксами `_bal.bdf` мы называем баланс-спектрами (а не плоскими полями, которые все-таки есть картины индивидуальной чувствительности пикселей, а не совокупной вдоль щели). Колебания отсчетов в балансах вокруг единицы отражают как шумы, так и реальные вариации чувствительности пикселей, задействованных в экстракции спектра ЛН. Задача усреднения балансов состоит в снижении случайного шума до значений порядка, или ниже величины реальных вариаций чувствительности, на большей части длин порядков.

Из проведенного сравнения результатов усреднения балансов видно, что корреляция их формы (т.е. реальная картина вариации чувствительности) видна хорошо при количестве усреднённых индивидуальных балансов больше или порядка 7. Поскольку с целью отсева следов космических частиц крайние значения в статистике при усреднении отбрасываются (опция `av_opt=median` в `AVERAGE/IMAGE`), то лучше усреднять не менее 9–11 балансов, имеющих одно и то же положение порядков в пределах  $\pm 0.05$  пикселя (см. раздел 2.4). Эти средние балансы записываются в файлы под именами групп с суффиксами `_bal`.

Наконец, с целью снижения привнесённых балансами шумов, можно применять сглаживание средних мастер-балансов (используемых как `CORRECT` для деления экстрагированных спектров объектов в PIPE/RADU) скользящим средним в пределах 10 пикселей. Дело в том, что эффекты (суммарной) вариации чувствительности проявляются в основном как волны именно такой пространственной частоты. Стоит также заметить, что деление на такие балансы оптимально экстрагированных спектров не совсем корректно по причине другого выбора весов пикселей, нежели при (линейной) экстракции ЛН. Эффект от деления на сглаженное поле на выходное отношение сигнал/шум незначим (Рис. 2.8)

Следует отдельно подчеркнуть, что ключевое слово `CORRECT` в контексте *echelle* несет в себе имя *изображения* спектра лампы накаливания, а не результата его экстракции. Поэтому мы используем его нестандартно.

**Заключение.** Применение деления на плоское поле даже таким способом с усреднением большого числа балансов не является однозначно рекомендуемым, поскольку на краях порядков и в синей области все равно сигнала ЛН недостаточно. Возможно, в адаптере спектрографа к лампе накаливания следует добавить светодиод повышенной яркости, имеющий гладкий спектр и большую яркость в синей области.



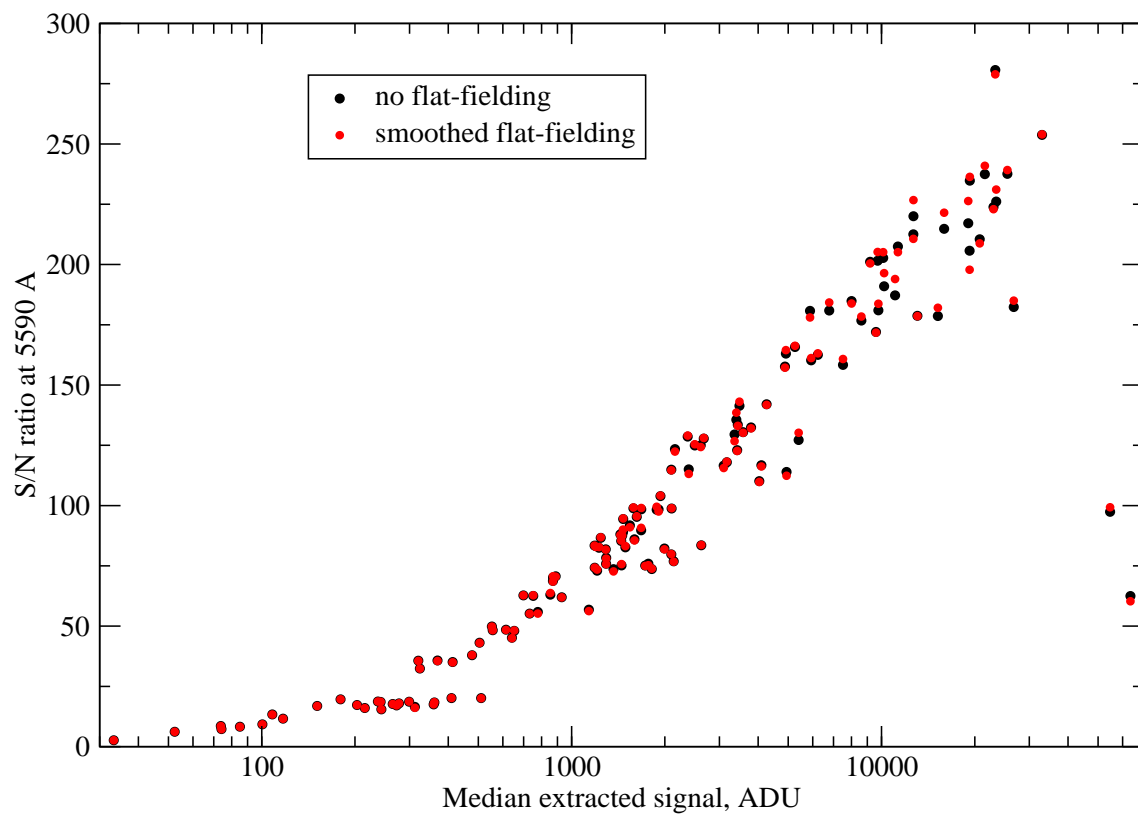


Рис. 2.8: Зависимость отношения сигнал/шум, измеренного в диапазоне  $\lambda\lambda 5540 - 5640\text{\AA}$ , от среднемедианного экстрагированного сигнала (медианы статистики изображения `e_s?????.bdf`). Видно, что деление на сглаженное плоское поле почти не влияет на S/N. Показаны результаты линейной экстракции.

Деление на плоское поле следует использовать как альтернативный вариант редукции данных, когда требуется убедиться в независимости выходных результатов работы от инструментальных эффектов детектора.

## 2.8 Спектрофотометрическая калибровка кривой реакции

В стандартном пакете *echelle* понятие инструментальной кривой реакции, сохранённой в файле **RESPONSE**, включает в себя совокупный эффект профиля блеска (blaze) и спектральной кривой чувствительности. Грубо говоря, **RESPONSE** получается делением стандартного спектра, ребинированного на сетку порядков эшеле, на полученный спектр этой звезды-спектрофотометрического стандарта. Однако в нашем случае этот метод не сработал.

Причина неудачи в том, что спектральное разрешение опорных спектров стандартных, опубликованных Астрофизическим Институтом в Алма-Ате, составляет  $50\text{\AA}$ , что недостаточно для детального представления наших спектров с разрешением  $0.25\text{\AA}$  длиной порядков около  $200\text{\AA}$ . В результате применения стандартной методики **RESPONSE/ECHELLE** в местах бальмеровских линий образуются характерные полукруглые горбы в чувствительности, а в скорректированных с таким **RESPONSE** спектрах вокруг (относительно узких) ядер водородных линий – провалы. Предлагаемый в описании контекста метод ручной коррекции соответствующих мест в порядках **RESPONSE** не даёт удовлетворительных результатов.

Поэтому мы приняли другую стратегию. Мы разделили определение функции блеска и кривой спектральной чувствительности на две независимых процедуры. Средняя функция блеска **BLAZE** определяется как среднее из всех индивидуальных профилей (**\*\_AFLAT.bdf**) и считается независимой от времени и определяемой раз и на весь сет. Она вычисляется простой командой **AVERAGE/IMAGE** и сохраняется в файле **srv/AFLAT0.bdf** в каталоге контекста *raduga*. Эта функция используется для коррекции кривизны порядков перед их сшивкой в единый спектр для получения выходного 1-мерного (“классического”) спектра.

Применение деления на средний профиль блеска, полученный по спектрам ЛН, приводит к тому, что сшитый спектр имеет проваленную середину, поскольку спектр лампы накаливания почти планковский и имеет температуру порядка  $3000\text{K}$ . Сшитый спектр звезды-спектрофотометрического стандарта мы интерполируем (интегрируем) на сетку с шагом в  $50\text{\AA}$  и делим стандартный спектр на результат. Такая стратегия гораздо выгодней, поскольку ожидаемая кривая чувствительности уже 1-мерная и гладкая, в отличие от результата калибровки **RESPONSE/ECHE**. Результат деления сглаживается сплайн-интерполяцией и сохраняется в каталоге **srv/** контекста и имя этого файла с путём (опять нестандартно) записывается в ключевое слово **RESPONSE**. Эта работа выполняется специальной процедурой **raduga\_sphcal.prg**.

В конечном итоге спектрофотометрическая коррекция в **PIPE/RADU** выполняется умножением сшитого спектра на **RESPONSE**. Перед этим выполняется проверка их совместимости по сетке (для данных основного волокна).

## 2.9 Алгоритм работы PIPE/RADU

Здесь мы приведём примерную блок-схему работы основной процедуры контекста – **raduga\_pipe.prg**. По ней можно ориентироваться в устройстве ее кода при необходимости внесения изменений в детали или параметры обработки.

Алгоритм (последовательность) работы программы **raduga\_pipe.prg**

-----

1. Проверка существования LNTAB (если !=NO), формирование FNAMBASE, импорт (raduga\_convert.prg) изображения (FLIP==Y: +флиппинг)
2. Определение типа изображения IMTYP, номера волокна FIBER, типа экстракции EXTRMTD и необх-ти определения порядков ORDETER, пре-,суффиксов вых.файлов, SCAN, LINTAB, ORDTAB, ВАКТAB - значений
3. IMTYP==BIAS: создание и проверка BIAS.bdf, запись RON, RETURN
4. Поиск соответствующих PROFILE, CORRECT в LNTAB
5. Вычитание BIAS
6. IMTYP==DARK,FLAT:  
RETURN
7. Коррекция плохих колонок
8. ORDETER==Y: Определение и проверка порядков (ORDTAB, ВАКТAB)
9. Отрезание зон оверскана по краям (<11,>1045)
10. EXTRMTD==0: проверка сущ-я PROFILE (если нет: FIBER==2 ? EXTRMTD=L : RETURN), определение сдвига (Ycorr) изобр-я относительно PROFILE,  
  
EXPTIME>RDG\_OPT(4) & |Ycorr|<RDG\_OPT(1) ? оптимальная экстракция : EXTRMTD=L  
Проверка количества CR (без краев): > RDG\_OPT(2)+EXPTIME\*RDG\_OPT(3)=>EXTRMTD=L
11. EXTRMTD==L:  
IMTYP!=LPK[2],OBJ2: фильтрация CR, линейная экстракция,  
запись X,ORDER измененных отсчетов в есr-таблицу  
IMTYP==OBJ2: вычитание фона по таблице back.tbl (т.е. ПЕРВОГО волокна)  
IMTYP==OBJ2,LPK2: линейная экстракция (FIBER==2: с SLIT=SLIT/2)
12. IMTYP==LN,LN2, DETBLAZE==Y: определение AFLAT (raduga\_flat.prg), баланс-изображения (\_bal[2]) и изображения профилей порядков (\_prf[2]), RETURN
13. IMTYP==LPK,LPK2: калибровка по длинам волн, проверка, RETURN
14. FFOPT==Y: проверка сущ-я CORRECT, /= CORRECT
15. Ребинирование экстр-го спектра и BLAZE (или AFLAT.bdf) на равномерную сетку SAMPLE, деление ге-спектра на ге-BLAZE ("уплощение" порядков)

16. Срощение порядков в единый 1-мерный а-спектр
17. Оценка S/N в 5540-5640 А (работает для SpCl<F), запись в дестр-р SNR5590
18. SPH==D: определение спектр-го отклика системы (raduga\_sphcal) RESPONSE
19. SPH==D,C: коррекция за отклик: a\_ /= RESPONSE

## Глава 3

# Работа с контекстом RADUGA при редукации данных

В этом разделе описана типовая процедура первичной редукации эшеле спектров с помощью контекста *raduga*.

### 3.1 Установка контекста RADUGA

Контекст “Радуга” поставляется в виде отдельного архива `radugred_DATE.tgz`, который необходимо разархивировать в директории стандартных контекстов среды ESO-MIDAS, обладая при этом правами её администратора (например, будучи `root`):

```
# cd /midas/04FEBp11.0/stdred
# tar xvfz /media/flash/radugred_may05.tgz
```

При этом в каталоге `stdred/` появится новая директория `raduga/` с файлами контекста. Обратите внимание, кроме стандартных каталогов `proc/`, `src/`, `help/`, `etc/`, в ней находится и каталог `srv/`, в котором находятся рабочие калибровочные данные контекста, доступ к которым на запись открывается для всех пользователей ESO-MIDAS. Эти права обеспечиваются процедурой инсталляции.

Кроме структуры директорий `raduga/`, из архива также распакованы и несколько модифицированных файлов контекста *echelle*. Они необходимы для более тонкой настройки этого контекста для работы с данными “Радуги” и не влияют на правильность работы контекста *echelle* с другими спектрами.

Есть ещё одно “узкое” место системы, которое необходимо изменить для работы кросс-корреляционного пакета процедур контекста: это сплайн-интерполяция табличных данных, изначально ограниченная наборами до 1000 точек исходной сетки данных. Для расширения этой возможности (интерполяция сшитых и синтетических спектров длиной в 10-20 тысяч точек необходимо в каталоге `prim/table/libsrc/` системы MIDAS открыть файлы `tdspline.for` и `tdinter.for` в текстовом редакторе и изменить параметры максимальной длины массивов 1000 на 30000 везде, где первое число встречается:

```
C в файле tdspline.for:
    PARAMETER (MXP=30000)
```

```
...
C в файле tdinter.for:
```

```

INTEGER NRDATA(30000),IMNO, IREF, IMOUT
...
REAL T(30000),C(30000)

```

С все три случая встречаются несколько раз!

И после этого сказать `make` в той же директории.

Затем можно приступить к инсталляции, запускаемой следующим образом:

```

# cd raduga/etc/
# ./install

```

До версии `may05` контекста этот скрипт делал все необходимые действия самостоятельно; позднее он стал использовать для компиляции и создания необходимых ссылок скрипт `update1` самой системы MIDAS. Инсталляция (обновление системы) в этом случае идёт в фоновом режиме после ввода подтверждения 'у' с клавиатуры и заканчивается с появлением отчёта о процессорном времени её выполнения.

## 3.2 Создание рабочей структуры директорий

В рабочем каталоге MIDAS создаём структуру директорий для редукции: каталог сета и в нем каталоги ночи и средне-групповых мастер-балансов и профилей порядков (скажем, `ln/`). Для этого можно ориентироваться на структуру директорий на носителе данных (обычно CD). Например:

```

~/midwork/raduga > mkdir sep04
~/midwork/raduga > cd sep04
~/midwork/raduga/sep04 > for ((i=14; i<28; i++)); do mkdir c49$i; done
~/midwork/raduga/sep04 > mkdir ln
~/midwork/raduga/sep04 > ls -p
c4914/  c4916/  c4918/  c4920/  c4922/  c4924/  c4926/  ln/
c4915/  c4917/  c4919/  c4921/  c4923/  c4925/  c4927/

```

Следует напомнить принятую в управляющем спектрографом контексте NICE расшифровку даты, дающей имя каталога ночи `SYMDD`: `Y` – последняя цифра года (2004: “4”), `M` – шестнадцатеричный номер месяца (сентябрь – 9, октябрь – a,...), `DD` – двузначное число – номер дня (01..31).

Далее монтируется носитель и запускается MIDAS и контекст *echelle*:

```

~/midwork/raduga/sep04 > mount /media/cdrom
~/midwork/raduga/sep04 > inmidas
          ESO-MIDAS version 04FEBp11.0 on Sony/Linux
Midas 001> SET/CONT  raduga
***** Context Spec enabled *****
...
***** Context Echelle enabled *****
...
***** Context RADUGA enabled *****
...
Midas 002>

```

### 3.3 Обработка данных положения порядков (кадров ЛН)

Для каждой ночи выполняется редукция спектров ЛН и сопутствующих им подложек. Первым делом надо подобрать правильные значения элементов ключевого слова `SCAN` для ограничения зоны поиска порядков в центральной 100-пиксельной полосе (см. раздел 2.2). Если требуется восстановить тот набор экстрагируемых порядков, который был описан выше (23 шт с абсолютными номерами с 56 по 34), то можно загрузить изображение звезды класса А-Ф и сориентироваться следующим образом: порядок, в котором линия  $H_\alpha$  расположена в центральной области, имеет номер 36, выше идёт (предпоследний) порядок, где она повторяется справа а ещё выше – порядок 34, в котором хорошо видна серия теллурических линий в виде характерной гребёнки.

Второй экстрагируемый порядок с синей стороны содержит хорошо заметную линию  $H_\gamma$  с правой стороны (третий – с левой); порядок с  $H_\delta$  (с левой стороны) уже обычно сильно расфокусирован и поэтому не экстрагируется. Значения `SCAN` должны быть таковы, что в 100-пиксельной полосе вокруг центра ещё не видны ненужные порядки. В центральном сечении это соответствует примерно 2/3 расстояния от крайнего порядка до следующего (ненужного) как с синей, так и с красной стороны.

Затем можно начинать редукцию ЛН:

```
Midas 004> CHANGE/DIRE c4914
current dir. now: /home/kolja/midwork/raduga/sep04/c4914
Midas 005> REDUCE/RADU /media/cdrom/c4914/c4914.fts opt=0
```

После этой команды в текущей директории создаётся каталог `pipe.cat` изображений `BIAS` и `LN`. Его можно при желании просмотреть редактором и затем запустить редукцию этой совокупности изображений:

```
Midas 006> REDUCE/RADU opt=2
```

В результате процедурой `pipemaster.prg` будет вызвана последовательность редукций с помощью команды `PIPE/RADU` согласно каталогу `pipe.cat`.

Однако лучше для начала запускать редукцию каждого изображения по-отдельности:

```
Midas 006> PIPE/RADU /media/cdrom/c4914/c1746.fts
Midas 007> PIPE/RADU /media/cdrom/c4914/c1750.fts
```

для обработки сначала подложки, а затем первого ЛН-кадра. При неудаче определения порядков (по причине неоптимальных значений `SCAN`) можно повторять выделение порядков вручную на уже подготовленном `PIPE/RADU` кадре, поправляя значения `SCAN`:

```
Midas 006> SET/ECHE SCAN=151,765
Midas 007> DEFINE/NOUGH c1750.bdf P4=2,50
```

Для каждого изображения подложки будет создан текущий мастер-`bias` `BIAS.bdf`, с которым в последующем запуске будет обработан кадр ЛН.

Для каждого изображения ЛН будет проведено определение положения порядков, сохранённое в виде таблицы `order.tbl` (или `order2.tbl` для второго волокна, если такие данные имеются). Затем порядки будут экстрагированы в `e_`-файл и с ним будет запущен `raduga_flat.prg` для получения профиля функции блеска `AFLAT.bdf`. Процесс аппроксимации порядков полиномами будет виден на графическом дисплее. Экстрагированный спектр затем будет поделен на `AFLAT` для получения баланс-спектра `*_bal.bdf`, сам `AFLAT` будет

отнормирован и сохранен в виде \*\_AFLAT.bdf, а с входным изображением, обработанным FILTER/ECHE до экстракции, будет получен кадр нормированных на AFLAT профилей порядков \*\_prf.bdf. Здесь звездочка играет роль имени входного кадра без пути и расширения.

По достижении устойчивой работы эту операцию необходимо повторить в каталоге каждой оставшейся ночи.

### 3.4 Создание среднего профиля блеска BLAZE

Все созданные по спектрам ЛН индивидуальные профили блеска следует усреднить в один рабочий мастер-blaze, работая в директории ln:

```
Midas 007> CHANGE/DIRE ../ln
Current dir. now: /home/kolja/midwork/raduga/bal
Midas 008> CREATE/ICAT aflats.cat ../c????/c????_AFLAT.bdf
Image catalog tmp with 25 entries created...
Midas 009> AVERAGE/IMAG AFLATO = aflats.cat
```

Этим усреднением будут ликвидированы отдельные отклонения аппроксиманты, вызванные дефектами экстрагированных спектров, такими как недовычтенные космические частицы. Получившееся изображение можно проинспектировать на предмет формы порядков:

```
Midas 010> CREATE/GRAPH
Midas 011> PLOT/ROW AFLATO @11
```

и, если все в порядке, зарегистрировать как мастер-blaze:

```
Midas 012> SET/ECHE BLAZE=" ../ln/AFLATO.bdf "
```

Под таким именем он будет доступен из любой из директорий ночи. Можно также сохранить его и в каталоге srv контекста *raduga*:

```
Midas 012> $cp AFLATO.bdf {rdg_srv}AFLATO.bdf
Midas 013> SET/ECHE blaze="{rdg_srv}AFLATO.bdf "
```

### 3.5 Группировка данных сета по положению порядков эшелле

Далее необходимо проверить, каковы сдвиги между сетками порядков, полученными по разным кадрам ЛН в течение сета (см. раздел 2.4). Это требуется для того, чтобы разделить ночи на группы, в пределах которых сдвиги малы (менее 1/10 пикселя). Тогда усреднение баланс-спектров \*\_bal.bdf для коррекции плоского поля (если таковая будет использована) и изображений профилей порядков \*\_prf.bdf для оптимальной экстракции (если нужна) будет правомерно. Если ни то ни другое использовано не будет (FFOPT=NO, EXMTD=LINEAR), можно пропустить этот этап. Заметим, что в контексте мы более НЕ используем корректирующие данные, полученные по одному кадру ЛН, а используются только результаты их усреднения.

Посмотреть сдвиги порядков интересно и просто для того, чтобы оценить механическую стабильность спектрографа в течение сета, что имеет отношение и к стабильности калибровки по длинам волн (исследуемой также отдельно). Для этого в **корневом каталоге** сета запускается процедура корреляции аппроксимированных положений порядков cororder.prg:



```
Midas 014> @s cororder.prg c4914/c1750_order.tbl
```

Первым параметром процедуры является имя опорной таблицы порядков, относительно которой будут мериться сдвиги. Вторым параметром есть маска имён таблиц для корреляции и необязателен; по умолчанию он даёт все таблицы `order.tbl` всех подкаталогов ночей.

После запуска процедуры на графическом дисплее будут последовательно выведены гистограммы сдвигов аппроксимант порядков `:YFIT` из таблиц `order.tbl` в одноимённых точках  $X, m$ . Красным цветом поверх выводятся гистограммы сдвига сырых данных измерений `:Y`. Чем шире профили гистограмм, тем больше отличается форма порядков исследуемой таблицы от опорной. Обычно ширина профиля коррелирует со сдвигом гистограммы от нуля как целого. Параллельно с графическим выводом создаётся таблица `cororder.dat`, куда записываются минимальная (в смысле 5%-й отсечки распределения), максимальная (95%-я) границы и медианное смещение гистограммы относительных сдвигов порядков.

Визуализация этих характеристик гистограмм относительного сдвига сеток порядков делается с помощью утилиты `cororder_plt.prg`:

```
Midas 015> @s cororder_plt.prg
```

Она выдаёт содержимое файла `cororder.dat` на графический дисплей в виде зависимости относительного сдвига порядков от номера файла ЛН, где чёрной кривой рисуются верхние границы гистограмм сдвига, зелёной – нижней, а чёрное – медианные сдвиги порядков. Синими вертикальными прямыми рисуются границы ночей.

Ось ординат этого графика представляет собой сдвиг сетки порядков, который для усредняемых продуктов обработки спектров ЛН должен быть в пределах  $\pm 0.1$  пикселя.

Для целей выбора подходящего мастер-плоского поля и средней картины профилей порядков для оптимальной экстракции, границы групп изображений, выбранных с помощью `cororder.prg`, записываются в таблицу, чьё имя сохранено в ключевом слове контекста `raduga LNTAB`. Под этим именем эта таблица должна быть доступна из каждого из рабочих каталогов редукции ночей, то есть оно содержит путь наверх `../`. Например, `LNTAB=" ../ln/ln.tbl"`. В таблице две колонки – `:FRAME` и `:GROUP`, где первая содержит имя изображения первого спектра, входящего в группу, а вторая – имя этой группы, которое есть основа имени файла как плоского поля, так и изображения профилей порядков. Пример содержания таблицы:

```
Midas 016> READ/TABLE ln.tbl
```

| Sequence | FRAME | GROUP      |
|----------|-------|------------|
| 1        | c1739 | ../ln/grp1 |
| 2        | c1779 | ../ln/grp2 |
| ...      |       |            |

Это означает, что, например, когда `PIPE/RADU` потребуется имя файла баланса или профиля порядка для обработки файла `c1752.fts`, то будут искаться, соответственно, `../ln/grp1_bal.bdf` и `../ln/grp1_prf.bdf`. Если соответствующие файлы найдены не будут, то редукция останавливается с сообщением об этой ошибке. В противном случае она продолжается, а имена текущих баланса и профиля сохраняются в ключевых словах `CORRECT` и `PROFILE`.

### 3.6 Усреднение баланс-спектров и профилей порядков по группам

Когда весь сет разбит на группы (может быть, также, и всего одна группа на сет), необходимо собрать все имеющиеся индивидуальные баланс-спектры ЛН и профили их порядков и усреднить в рамках этих же групп. Для этого создаются сначала общие (временные) каталоги балансов и профилей:

```
Midas 017> CHANGE/DIRE ln/
Current dir. now: /home/kolja/midwork/raduga/bal
Midas 018> CREATE/ICAT bals.cat ../c????/c????_bal.bdf
Image catalog tmp with 25 entries created...
Midas 019> CREATE/ICAT profs.cat ../c????/c????_prf.bdf
Image catalog tmp with 25 entries created...
```

а затем эти каталоги копируются в каталоги групп балансов и профилей `bal1.cat...`, `baln.cat` и `prf1.cat...`, `prfn.cat`, где `n` – число групп, и в текстовом редакторе из них удаляются не входящие в свою группу изображения.

Затем эти каталоги используются для усреднения с отбросом крайних значений. Например, если в каталог `prf1.cat` входят 11 изображений профилей порядков, то средний профиль первой группы будет получен так:

```
Midas 020> AVERAGE/IMAG grp1_prf.bdf = prf1.cat av_option=median,4,4,index
```

Таким образом, в усреднении профиля в каждом пикселе войдут  $4+1+4=9$  значений пикселей усредняемых изображений, которые в отсортированном массиве значений занимают со 2-го по 10-е место. Краевые значения будут отброшены. Так же надо усреднить и остальные группы профилей и балансов.

### 3.7 Начальная ручная калибровка длин волн

Контекст *raduga* поставляется с опорной калибровкой `oldcalibr` в каталоге `srv/`, которая используется в методе `WLCMTD=GUESS` калибровки дисперсионного соотношения и зарегистрирована в ключевом слове `GUESS`. В случае неудачи использования ее для начальной калибровки данных другого сета необходимо провести ручную калибровку, установив метод `PAIR`:

```
Midas 021> SET/ECHE WLCMTD=PAIR
Midas 022> PIPE/RADU /media/cdrom/c4914/c1751.fts
```

На дисплее изображений появится спектр ЛПК с приглашением пометить две разные линии, каждую в двух смежных порядках спектра (см. `HELP IDENTI/ECHE`). Для ориентации можно использовать размеченное изображение спектра ЛПК, показанное на рисунке 3.1.

Если количество найденных линий приемлемое (от 600 до 1000), но калибровка оказалась неудачной (из-за ошибки отождествления, например), то можно повторить её, вызвав отдельно команду `IDENTI/ECHE` без параметров.

Если в результате ручной калибровки будет получено удовлетворительное решение (более 300–400 отождествлённых линий), то можно выставить обратно метод автоматической калибровки и сохранить полученную калибровку в качестве опорной `oldcalibr`, попробовав затем ее осуществить по следующему снимку ЛПК:

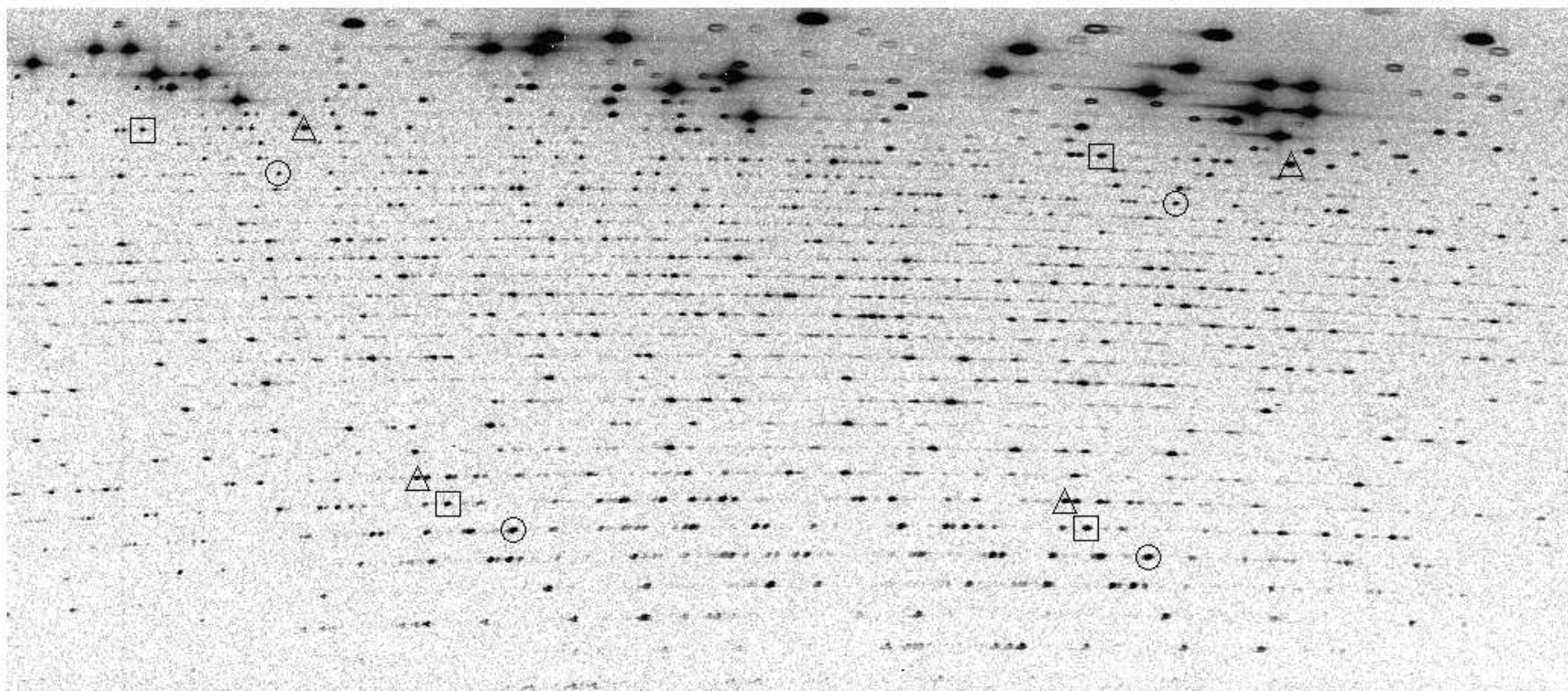


Рис. 3.1: Изображение спектра ЛПК для использования в методе PAIR. На рисунке помечены следующие линии: круги:  $6145.43\text{\AA}$  и  $4277.55\text{\AA}$ , квадраты:  $6643.72\text{\AA}$  и  $4348.06\text{\AA}$ , треугольники:  $6677.25\text{\AA}$  и  $4426.01\text{\AA}$ . Вверху длинноволновая область, внизу – коротковолновая. Квадрат и треугольник в **левом верхнем** углу отмечают 35-й порядок; круг – 38-й.

```
Midas 023> SET/ECHE WLCMTD=GUESS
Midas 024> SAVE/ECHE {rdg_srv}oldcalibr
Midas 025> PIPE/RADU /media/cdrom/c4915/c1759.fts
```

Обычно процесс установления надёжной калибровки быстро сходится и достигнутый хороший результат надо снова закрепить командой SAVE/ECHE.

Совет. Если в результате подготовительной работы и отладки редукции уже получены оптимальные параметры (SCAN, FFOPT, EXTMTD...), то сохраненная после этого сессия *oldcalibr* содержит их наряду с конкретной калибровкой по длинам волн. Чтобы каждый раз при последующем входе в MIDAS и вызове контекста *raduga* не устанавливать эти значения заново, можно инициализировать контекст из этой сессии:

```
Midas 025> INITIA/ECHE {rdg_srv}oldcalibr
```

Заметим, однако, что эта стандартная команда контекста *echelle* НЕ устанавливает ключевые слова, специфичные для контекста *raduga*. Установить все подобранные параметры альтернативно можно, изменив или добавив соответствующие команды прямо в *raduga.etc* (при условии, конечно, что Вы имеете к нему доступ на запись).

### 3.8 Обработка всей совокупности спектров ночи

Когда подготовка калибровочных данных закончена, можно приступить к основной работе. Для этого подготавливается полный каталог изображений ночи в нужной последовательности:

```
Midas 026> CHANGE/DIRE c4914
current dir. now: /home/kolja/midwork/raduga/sep04/c4914
Midas 027> REDUCE/RADU /media/cdrom/c4914/c4914.fts opt=1
```

После этой команды в текущей директории создаётся каталог *pipe.cat* всех изображений. Затем можно запустить редукцию:

```
Midas 028> REDUCE/RADU opt=2 detblaze=n
```

**Внимание! По умолчанию в контексте установлена редукция с линейной экстракцией и без деления на баланс-спектры! (EXTMTD=LINEAR, FFOPT=NO).** В ходе работы на дисплеях показываются промежуточные и окончательные результаты редукции – подгонка фона к меж-порядковым значениям потока, результаты экстракции космических частиц и спектра, автоматическая итеративная калибровка длин волн для ЛПК. Спектры объектов также ребинируются и сшиваются в выходной 1-мерный спектр, который выводится на графический дисплей. Если имя звезды находится в каталоге спектрофотометрических стандартов FLUXTAB, то запускается калибровка кривой реакции (вместе со спектром ЛН) процедурой *raduga\_sphcal.prg*. Параметр запуска *detblaze=n* позволяет пропустить этапы аппроксимации порядков процедурой *raduga\_flat.prg* и вычисления профилей и балансов по спектрам ЛН, выполняется только определение положения порядков.

Заметим, что первой звездой, которая обрабатывается для нового сета, должна быть звезда-спектрофотометрический стандарт. Иначе процедура коррекции может выдать сообщение о несовместимости корректирующей кривой RESPONSE со сшитым спектром по сетке длин волн или (в худшем случае случайного совпадения) произойдёт неверная коррекция.

Отменить коррекцию вообще можно, задав PIPE/RADU параметр SPH=NO. Для REDUCE/RADU придётся в коде добавить этот параметр к вызову `raduga_pipe.prg` в процедуре `pipemaster.prg`.

Отдельные части последовательности `pipe.cat` можно обрабатывать запуском

```
Midas 029> REDUCE/RADU opt=2 start=10 end=15
```

для обработки с 10-го по 15-е изображение в каталоге `pipe.cat`.

По окончании редукции можно удалить ненужные файлы. Для этого можно использовать простейший скрипт, содержащий команду по удалению всего “мусора”, создаваемого PIPE/RADU:

```
Midas 030> ${rdg_srv}clean.sh
```

### 3.9 Работа с файлами результатов обработки

В заключение приведем некоторые команды MIDAS, удобные для просмотра спектров:

CREATE/GRAPH - создание Graph-дисплея

CREATE/DISP - создание дисплея изображений

PLOT/ROW a\_c1234 ? 6510,6610 - вывод на Graph конечного спектра в диапазоне 6510,6610 Ангстрем

PLOT/ROW e\_c1234 @10 - вывод экстрагированного 10-го порядка

LOAD/IMAGE e\_c1234 scale=1,10 cuts=0,10000 - вывод экстрагированных порядков на дисплей изображений так, что по вертикали 1 строка размывается на 10 пикселей, а интенсивности идут от темного к белому в диапазоне 0,10000 ADU.

LOAD/TABLE crm\_c1234 x order - рисование данных о космических частицах из таблицы `crm_c1234` ПОВЕРХ загруженного ранее изображения экстрагированного спектра `e_c1234` (Примечание: возможен сдвиг символов загруженной таблицы по отношению к частицам, видимым в спектре, на 10 пикселей влево из-за дескриптора START(1), неравного 1. См. COMPUTE/TABLE для коррекции)

LOAD/TABLE crm\_c1234 x y - рисование данных о космических частицах из таблицы `crm_c1234` ПОВЕРХ загруженного ранее исходного изображения спектра `e_c1234`

CLEAR/CHAN 2 - очистка на дисплее слоя символов, выведенных из таблицы

LOAD/ITT ramp - установка линейной шкалы отображения интенсивностей (действует после следующей загрузки изображения командой LOAD/IMAGE)

LOAD/ITT log - установка логарифмической шкалы отображения интенсивностей (действует после следующей загрузки изображения командой LOAD/IMAGE)

STATIS/IMAGE e\_c1234 [500,10:600,10] - вычисление статистики отсчетов в 10-м порядке экстрагированного спектра с 500-го по 600-й пиксел

OUTDISK/FITS a\_c1234.bdf a\_c1234.fts - преобразование MIDAS-файла в FITS-стандарт (для изображений и таблиц)

OUTDISK/ASCII a\_c1234.bdf a\_c1234.asc - преобразование 1-мерного изображения в колонку цифр (сетка длин волн не выводится)

READ/DESC a\_c1234 - чтение базовых дескрипторов изображения спектра (START - длина волны первого пикселя, STEP - шаг длины волны)

READ/DESC a\_c1234 history - чтение истории создания файла

## Глава 4

# Кросс-корреляционная обработка спектров

Целью кросс-корреляционной обработки спектров является определение доплеровского смещения их линий по отношению к модельному спектру для определения лучевых скоростей фотосфер звёзд. В нашем случае за модельные приняты синтетические спектры подходящих спектральных классов и классов светимости, вычисленные для лабораторной системы отсчёта (то есть без смещения длин волн по отношению к наблюдателю). Альтернативный метод кросс-корреляции с наблюдаемыми спектрами звёзд-стандартов здесь не рассматривается, хотя и, возможно, равно пригоден для вычислений (относительных) лучевых скоростей.

### 4.1 Основные принципы и подходы к коррелированию

В качестве стратегии кросс-коррелирования с минимальными искажениями данных взаимными трансформациями систем координат синтетических и наблюдаемых спектров были выбраны две:

1. Корреляция синтетического спектра, преобразованного в систему отсчёта детектора  $\{X\text{-порядок}\}$  с неребинированным наблюдаемым спектром, со сложением корреляционных профилей отдельных порядков. Это корреляция “в стиле CORAVEL”, пользующаяся линейной зависимостью дисперсии эшеле от номера порядка.

2. Корреляция синтетического спектра на сетке длин волн выходных наблюдаемых спектров со сшитыми (конечными и полностью откалиброванными) спектрами, выполняемая в пространстве логарифмов длин волн (где доплеровский сдвиг опять-таки не зависит от (логарифма) длины волны).

Процедура в стиле CORAVEL работает путём корреляции экстрагированного спектра ( $e_{-}$ -спектра) с специально подготовленной маской, полученной трансформацией синтетического спектра в пространство отсчётов детектора и номеров порядков эшеле при помощи известного обратного дисперсионного соотношения спектрографа на текущий момент наблюдений. Она разработана для двух типов масок – *целевой (двоичной) маски*, определяемой как набор П-образных профилей пропускания фиксированной ширины и центрированных на известные длины волн линий поглощения, и, собственно, *маски-синтетического спектра* (также называемого для единообразия *маской*, чтобы отличать теоретический спектр от его представления в пространстве  $X\text{-}m$  детектора). Щелевая маска используется для поздних спектральных классов (F–M), а маска-синтетический спектр – для ранних. Оба ти-

па маски создаются своими специально написанными программами; коррелирование и сложение результирующих профилей производится в суммарную корреляционную функцию также написаны в форме программ на С, запускаемых из обрамляющих MIDAS-процедур.

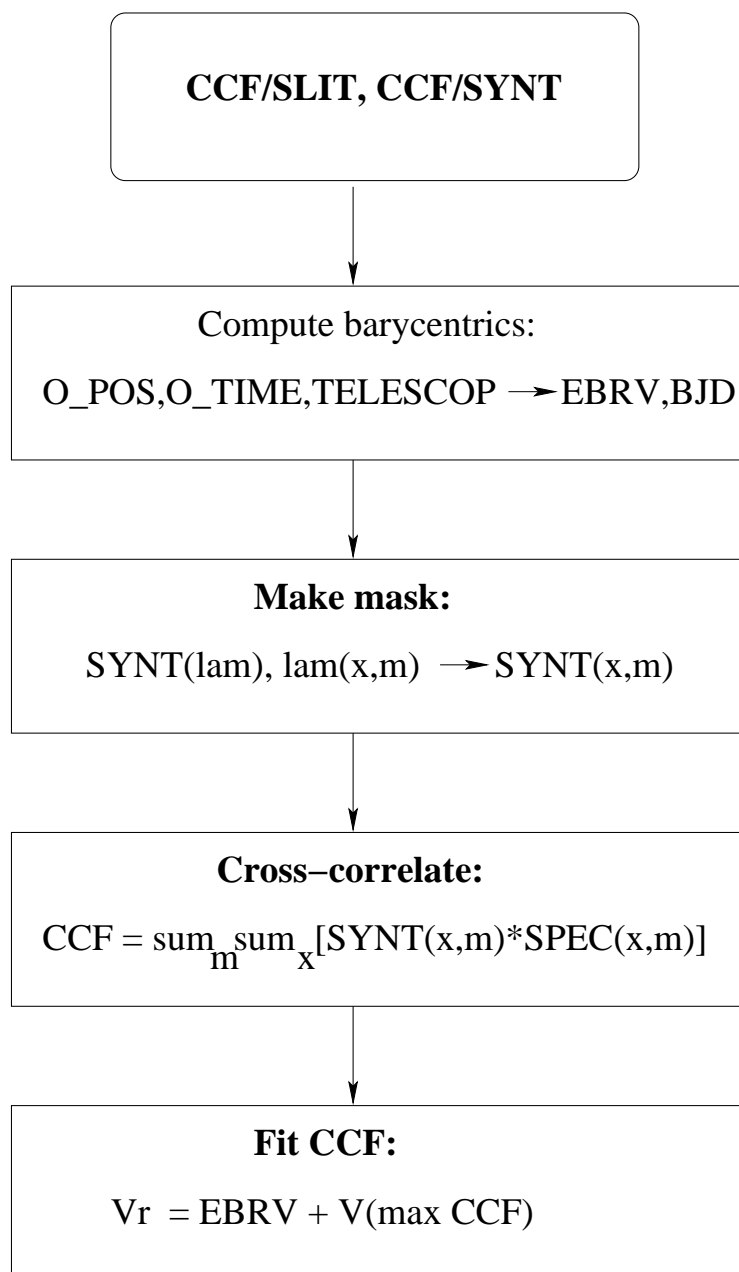


Рис. 4.1: Блок-схема корреляции в стиле CORAVEL

Вторая версия кросс-корреляционной обработки выполнена совершенно по-иному. Никакие знания о спектрографе, его дисперсионном соотношении и т.п., равно как и эшелеепроисхождение спектров не используются, а процедура полагается на правильное ребинирование выходных спектров на равномерную сетку длин волн, выполняемое в “трубе” пакетной обработки данных “Радуги” в ходе выработки выходных шитых спектров (a\_-файлов). При этом, разумеется, происходит потеря информации об изначальных потоках в колонках

ПЗС и вносится некоторый “шум ребинирования”, теряется разность профилей одной линии в разных порядках и т.п., зато коррелирование можно производить для спектров любого происхождения (не только от “Радуги”). В этом случае, конечно, прямая процедура кросс-корреляции спектра и модели для длинных сеток длин волн невозможна из-за пропорциональности доплеровского сдвига длине волны. Поэтому вместо этого производится серия умножений спектра на сдвинутые на известные доплеровские сдвиги синтетические модели и взятие интегралов произведений. Это эквивалентно коррелированию в пространстве логарифмов длин волн, однако, ввиду возможности заранее подготовить наборы сдвинутых моделей для сколь угодно подробных сеток доплеровских сдвигов, такой подход гораздо проще и производительнее.

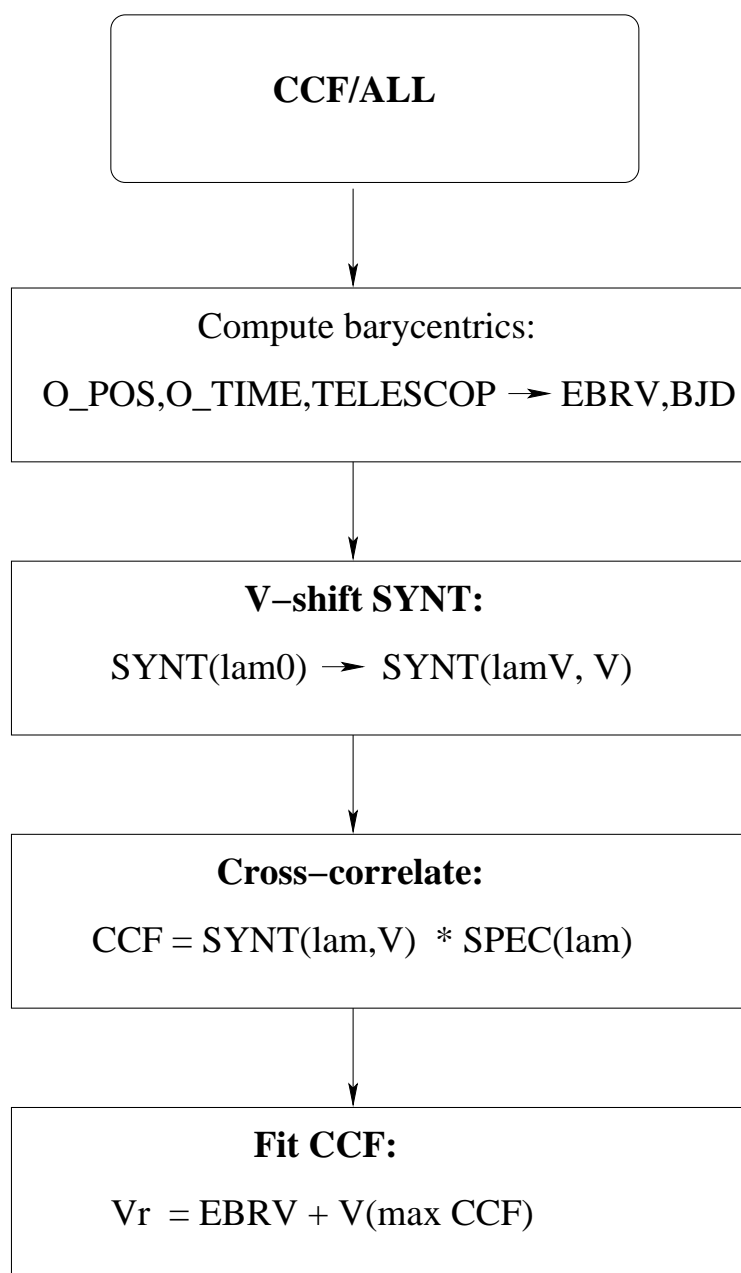


Рис. 4.2: Блок-схема “прямой” корреляции со сдвигаемым синтетическим спектром



Обе стратегии вычисления лучевых скоростей подразумевают точное вычисление барицентрической коррекции скоростей для записанных в заголовках спектров момента и места наблюдений и координат объекта. Выходные корреляционные профили одинаково подвергаются подбору аппроксимант для вычисления скорости экстремума профиля. В обоих подходах одним из решающих факторов успеха является тщательная подготовка модельных спектров (если это не щелевые маски, требующие лишь хорошего набора длин волн линий). Эти спектры обязаны учитывать действительное соотношение интенсивностей линий (правильный спектральный подкласс) и их ширин, быть адекватно вращательно уширены для представления наблюдаемого  $v \sin i$ , и, специфично, должны быть свёрнуты с моделью аппаратного контура  $P(d\lambda, \lambda)$  (зависящего, т.о., и от длины волны, что особенно актуально для спектрографов с линзовыми камерами).

Изложенные принципы и стратегии схематично показаны на Рис. 4.1 и 4.2.

## 4.2 Детали реализации

Основная часть процедур описанных выше алгоритмов выполнена на основе стандартных средств MIDAS. Исключение составляют, как было уже упомянуто выше, подготовка маски и её использование при коррелировании в стиле CORAVEL.

**Подготовка синтетических спектров** Для расчета теоретических спектров определенного спектрального класса и класса светимости используются данные Венской базы VALD (Vienne Atomic Line Database), полученные через Интернет или по запросу по электронной почте. Данные об ускорении силы тяжести  $g$  и эффективной температуре  $T_{eff}$ , соответствующим выбранному классу, для помещения в запрос можно взять из справочника Аллена “Астрофизические величины” или более поздних источников. Таблицы длин волн и других параметров линий поглощения, полученные из VALD (например, см. `raduga/srv/b0i.dat`), для получения исходных данных для создания щелевых масок просто преобразуются в формат MIDAS-таблиц с колонками `:WAVE` и `:DEPTH` (остальные не используются) и могут быть далее просмотрены и селектированы для создания оптимального по глубине и изолированности от соседних линий набора. Для “Радуги” в щелевых масках (для звезд поздних классов) не следует использовать линии с глубиной менее 0.5% и расстояниями до соседок менее 1Å.

Полный набор атомных данных о характеристиках линий используется для вычисления синтетических спектров (как для спектров-масок в стратегии типа CORAVEL так и для прямой корреляции). Для этого используются внешняя программа SYNTH, написанная Н. Пискуновым (Институт Астрономии РАН, 1993). Программа включена в пакет редукции *raduga*. Особенностью используемой версии программы является специфическая форма континуума спектров, поэтому вычисления проводятся также и для пустого набора линий с теми же характеристиками  $T_{eff}$ ,  $g$  и затем полученный чистый “континуум” используется для нормировки синтезированного спектра на интервал интенсивностей [0..1]. Входные таблицы для программы подготавливаются из полученных из VALD файлов при помощи переформатирующего скрипта `vald2synt.sh`. Результаты синтеза представлены на оптимальной (неравномерной) сетке. Требование, что синтетический спектр должен иметь шаг не более 1/2 формального разрешения спектрографа (т.е. порядка 0.12Å для “Радуги”) в рабочем диапазоне длин волн, выполняется заведомо.

Результаты работы программы (продукт деления спектра на свой же континуум) затем уширяются аппаратным контуром и профилем вращения звезды. Эта процедура (скрипт

`ccf_model.prg`) выражается свёрткой синтезированного спектра с соответствующими ядрами. Однако, так как обрабатываемые спектры зачастую (как, например, в “Радуге”) имеют большую протяженность, то эффектами зависимости ширины аппаратного контура и вращательного уширения линий уже пренебрегать нельзя. Поэтому разработанная процедура свёртки с указанными функциями работает в более узких перекрывающихся окнах шириной около  $200\text{\AA}$ , покрывающих последовательно весь рассматриваемый диапазон длин волн (свёртка выполняется методом быстрого преобразования Фурье при помощи процедуры `convolfft.prg`). Для работы свёртки участки спектра интерполируются с входной оптимальной сетки на равномерную с шагом  $0.02\text{\AA}$ . Результаты такой работы сшиваются обратно в выходной единый уширенный спектр при помощи процедуры сшивки, работающей для сшивки порядков эшелювого спектра в контексте ECHELLE системы ESO-MIDAS. Кратко, эта процедура для перекрывающихся участков (“порядков”) берет среднее взвешенное значение с весом, линейно нарастающим от 0 до 1 вдоль участка перекрытия. Таким образом имитируется плавное изменение профилей функций-ядер свёртки с длиной волны. Выходной спектр интерполирован на более редкую равномерную сетку с числом узлов около 30000 (шаг порядка  $0.1\text{\AA}$  для диапазона длин волн  $4000\text{--}7000\text{\AA}$ ).

**ВНИМАНИЕ!** Поскольку сплайн-интерполяция без сглаживания в MIDAS подразумевает выработку коэффициентов сплайнов для всех узлов исходной сетки (синтетического спектра), программы `tdspline.for` и `tdinter.for`, используемые командами INTERP/..., завершаются неуспешно с сообщением “Local storage exceeded (S too small)” для сеток длиннее 1000 узлов. Так как синтетические спектры для “Радуги” гораздо длиннее (порядка 20000 узлов), требуется изменение исходного кода этих программ (написанных довольно примитивно), описанное в разделе 3.1.

Следует указать, что для работы процедуры уширения синтетического спектра необходимо наличие процедуры генерации изображения аппаратного контура для заданной длины волны `ccf_getpsf.prg`. Для спектрографа “Радуга” простейшей моделью аппаратного контура служит гауссиана с полушириной, зависящей от длины волны как полином третьего порядка:

$$P(\Delta\lambda) = C \exp\left(\frac{-\Delta\lambda^2}{2\sigma(\lambda)^2}\right) \quad , \text{ где } \sigma(\lambda) = a + b\lambda + c\lambda^2 + d\lambda^3$$

Константа  $C$  нормирует профиль на единичный интеграл. Описанный полином строится программой `raduga_fitlpk.prg` подгонки профилей линий спектра калибровочной лампы (с полым катодом у “Радуги”) гауссианами. Созданная в результате работы этой программы таблица `srv/fitlpk.tbl` ширины профилей линий несёт в себе и коэффициенты указанной аппроксимации в дескрипторах. Пример подгонки полинома под измеренные ширины гауссового профиля линий показан на Рис. 4.3. Эту работу по определению аппаратного профиля нужно провести отдельно, лучше по сшитому спектру калибровочной лампы, усреднённому по периоду, когда калибровка держалась стабильно.

В качестве функции вращательного уширения взята относительно простая классическая модель из книги “Наблюдения и анализ звёздных фотосфер” Д.Грея (М., Мир 1980):

$$G(\Delta\lambda) = C_1 \left(1 - (\Delta\lambda/\Delta\lambda_L)^2\right)^{1/2} + C_2 \left(1 - (\Delta\lambda/\Delta\lambda_L)^2\right) \quad , \text{ где}$$

$$\Delta\lambda_L = \lambda \times v \sin i/c \quad , \quad C_1 = 2 \frac{(1 - \epsilon)}{\pi \Delta\lambda_L (1 - \epsilon/3)} \quad , \quad C_2 = \frac{\epsilon}{2 \Delta\lambda_L (1 - \epsilon/3)}$$

где  $\epsilon$  – коэффициент потемнения диска звезды к краю (берётся из результатов расчёта синтетического спектра). Профиль этой функции на заданной сетке и данной длины волны строится программой `ccf_getrot.prg`.

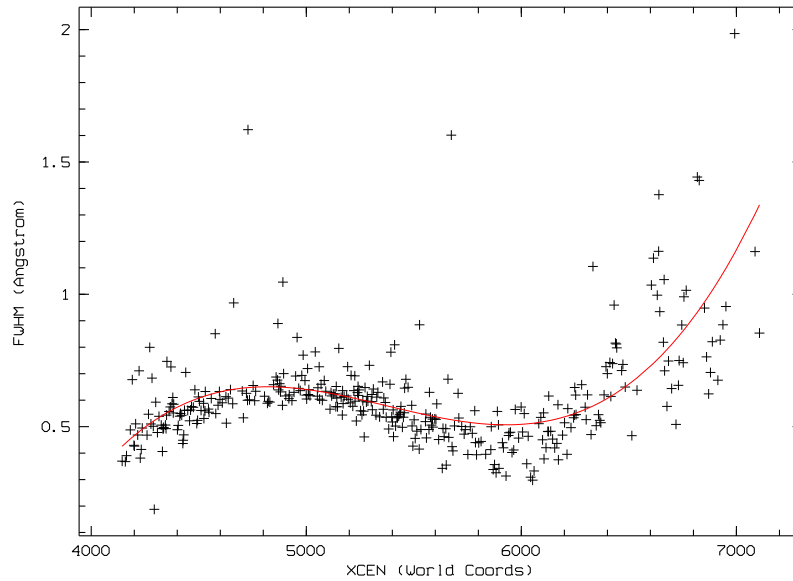


Рис. 4.3: Полуширины гауссиан профилей линий лампы с полым катодом спектрографа “Радуга”, аппроксимированные полиномом третьего порядка.

Эти результаты уширения синтетического спектра в модели наблюдаемого спектра процедура `ccf_model.prg` сохраняет в таблицах MIDAS с колонками `:WAVE` и `:BSPEC`. Частота сетки синтетических спектров по спектральным подклассам должна быть достаточной для избежания ошибки лучевой скорости, связанной с различием классов модели и звезды. По-видимому, практична частота в 2-3 подкласса для ранних спектральных классов (A0 и ранее) и в 5 подклассов или 1 класс для поздних (напомним, что Измеритель Лучевых Скоростей ГАИШ удовлетворительно работает с одной маской класса K2III для всех звёзд “краснее” F5, хотя для него сделана и маска типа F5V). Не исключено, однако, что щелевая маска для поздних классов звёзд будет работать не хуже, чем прямая корреляция с синтетическим спектром.

Еще одно измерение создаваемой описанным образом сетки модельных спектров задаётся набором скоростей вращения. Для ширины аппаратного контура в 30 км/с (“Радуга”) подходящими узлами, вероятно, являются значения типа 0, 30, 60, 100, 160 и 300 км/с. Выходные таблицы спектров получают имена типа `a0v0.tbl`, `b0i30.tbl` и т.п, символизирующие спектральный тип и осевую скорость вращения, использованную при уширении.

**Барицентрическая коррекция** использует для вычислений значения следующих дескрипторов изображений спектров: `O_POS`, `O_TIME`, `IDENT` и `TELESCOP`. Первый (импортированный из полей RA-OBS и DEC-OBS заголовка FITS-файла) даёт положение объекта на эпоху 2000.0, прецессируемое на эпоху наблюдений. Коррекция за прецессию сделана для чистоты вычислений и приводит в конечном счёте к изменению бари-коррекции лучевой скорости до  $\pm 40$  м/с. Однако сами координаты должны быть достаточно точными: ошибка в 1 градус выражается в погрешности лучевой скорости более 0.5 км/с.

Координаты обсерватории часто отсутствуют в заголовке файлов спектров, поэтому они берутся из специальной таблицы `sites.tbl`, хранящейся в директории `srv/` контекста `raduga`. Долгота и широта в традиционном формате считываются из строки, где значение

дескриптора TELESCOP спектра и одноименной колонки совпадают.

Время начала и длина экспозиции, заданные по UT в дескрипторе O\_TIME, складывается из полей FITS-заголовка DATE-OBS, TM-START и EXPTIME и, вместе с координатами объекта и телескопа, позволяет вычислить барицентрическую юлианскую дату середины экспозиции и барицентрическую коррекцию лучевой скорости, сохраняемые в выходной таблице (обычно `velores.tbl` в колонках :BJD и :EBRV, соответственно. Одновременно записываются и имя объекта IDENT, имя файла обрабатываемого и синтетического спектров в колонках :OBJECT, :FRAME и :MASK, соответственно. Дополнительно эпоха наблюдений сохраняется в :DATE\_OBS (как год плюс порядковый номер дня, начиная с 0 для 1 января, делённый на 365 или 366) и в :UTH (как дробный UT-час середины экспозиции).

Следует упомянуть, что иногда в данных “Радуги” встречаются даты с ошибочным годом “1910” в формате DD/MM/10. Для этих случаев в качестве значения года берётся, с соответствующим предупреждением, прочтённое в предыдущий раз и сохранённое в ключевом слове YEAR\_OBS.

Описанная процедура общая для обеих стратегий и заключена в скрипте `ccf_bary2.prg`. Приведённое подробное описание ввода информации из дескрипторов поможет адаптировать спектры из других источников (кроме “Радуги”) к обработке описываемым кросс-корреляционным пакетом контекста.

**Выработка щелевой маски** в CORAVEL-стратегии выполняется при помощи скрипта `ccf_mkm_red.prg`, запускаемого из скрипта `ccf_correl.prg` для команды CCF/SLIT. Эта процедура производит подбор обратного дисперсионного соотношения в таблице калибровки длин волн (типа `line.tbl`), имя которой выводится из значения дескриптора WLC обрабатываемого спектра. Предполагается, что полином обратного дисперсионного соотношения (порядка 3 по  $\lambda$  и 4 по номеру порядка) также хорошо представляет  $X$  по  $\lambda M$  и  $M$ , как обычное дисперсионное соотношение даёт  $\lambda M$  по  $X$  и  $M$ . После подбора полинома создаётся таблица маски и запускается программа `ccf_mkm_red.exe` (исходный текст на C – в файле `makemask.c`), которая для каждого порядка выбирает все видные в нём линии из входной таблицы-списка линий. Для каждой линии в каждом порядке далее вычисляются вещественные  $X$ -координаты коротко- и длинноволнового концов соответствующей её щели маски, исходя из ширины щели FWHM, которая в текущей версии программы постоянна и равна 2 пикселям.

**Выработка маски синтетического спектра** в CORAVEL-стратегии выполняется аналогичным образом скриптом `ccf_mkm_red.prg`, запускаемым из `ccf_correl.prg`, запущенной для команды CCF/SYNT. Также подбирается полином обратного дисперсионного соотношения и создаётся таблица маски. Запускаемая затем программа `ccf_mkm_azul.exe` (исходник `mkm_azul.c`) просто вычисляет для каждой “линии” её положение  $X$  во всех порядках, где она видна. Слово “линия” здесь дано в кавычках, поскольку работа происходит не над списком линий, а над элементами уже синтетического спектра, то есть, иными словами, по нему создаётся модель наблюдаемого с данным дисперсионным соотношением спектра в пространстве  $X-m$ , ничего более.

Следует отдельно подчеркнуть, что создаваемые маски не хранятся, а относятся индивидуально к каждому спектру, точнее, – к каждому дисперсионному соотношению, полученному по ближайшему к нему снимку лампы с полым катодом, имя которого хранится в дескрипторе WLC спектра.

**Коррелирование е-спектра и маски** в CORAVEL-стратегии выполняется непосредственно после создания маски при помощи программ `ccf_red.exe` и `ccf_azul.exe` (исходники `sncsf.c` и `sncsf_azul.c`) для целевой и синтетической масок, соответственно. Спектр сдвигается на доплеровский сдвиг в заданных пределах скоростей и с заданным шагом скорости, вычисляемый в единицах  $X$  исходя из дисперсии в центре кадра.

Для целевой маски, значение кросс-корреляционной функции (далее – CCF) в текущем порядке суммируется из произведений значений спектра в пределах сдвигаемых щелей маски, с учётом дробной части пикселей, попадающих на границы щели маски.

Для синтетической маски производится суммирование произведений значений спектра в точках  $X$ , считанных из таблицы маски и сдвинутых на доплеровский сдвиг, на значения глубины DEPTH в этих точках. При этом значения спектра в дробных  $X$  вычисляются с помощью линейной интерполяции потоков между пикселями.

После коррелирования, профили CCF отдельных порядков (диапазон которых для коррелирования может быть отличным от полного) складываются с весами, пропорциональными числу щелей в данном порядке.

Корреляция в стиле CORAVEL производится два раза – предварительно с шагом 1 км/с на сетке, центрированной на скорость 0, и окончательно с центрирование CCF на предварительно определённую скорость максимума на сетке 0.5 км/с.

Следует заметить, что программы на С для создания масок и коррелирования были разработаны в 1997-1999 гг и не пересматривались в ходе дальнейшего совершенствования контекста *raduga*. На настоящий момент эти 4 программы и программа SYNTH являются единственными компилируемыми единицами контекста, все остальные процедуры контекста выполняются стандартными средствами MIDAS.

**Интерполирование синтетического спектра с доплер-смещением** выполняется с целью получить набор синтетических спектров для заданного множества скоростей смещения для т.н. прямой корреляции со сшитыми спектрами в пространстве  $\lambda$ . Смещение синтетического спектра выполняется пересчётом длин волн для данной скорости по формуле  $\lambda = \lambda_0 + \lambda_0 \cdot v/c$ , а затем спектр  $\lambda$  – *BSPEC* переносится на сетку длин волн исследуемых спектров с помощью сплайн-интерполяции 3-й степени, выполняемой командой INTERP/TT. Поскольку синтетические спектры гладкие и их сетка достаточно частая (примерно в 2 раза чаще сетки наблюдаемых спектров), то шум интерполяции получается существенно ниже шумов исследуемых спектров (качество интерполяции проверялось графически наложением интерполированных спектров на исходные).

Результаты сдвига входного табличного синтетического спектра сохраняются в виде изображений с соответствующе записанными дескрипторами START, STEP сеток по длине волны и лучевой скорости сдвига. В отличие от масок в корреляции в стиле CORAVEL, они пригодны для любого спектра заданной сетки длин волн и близкого спектрального класса.

Данная процедура реализована скриптом `ccf_vshift.prg`, запускаемым при помощи команды VSHIFT/CCF.

**Кросс-коррелирование а-спектра с доплер-смещённым набором** синтетических спектров выполняется, как уже говорилось выше, простым умножением наблюдаемого спектра на строки сдвинутых синтетических спектров и интегрированием результатов. При этом вычитается постоянная составляющая спектров, чтобы не происходило потери точности при интегрировании. Результаты интегрирования инвертированы для представления CCF в виде традиционного профиля с отрицательной амплитудой.

Интегрирование простое и поэтому выполняется в главном скрипте `ccf_correl_all.prg` команды `CCF/ALL`. Результаты записываются в таблицу с колонками `:SHIFT` (доплеровский сдвиг относительно лабораторной системы отсчёта) и `:CCF`. Дополнительно, с целью облегчения обработки `CCF`, вычисляются и сохраняются в колонке `:normCCF` значения функции, масштабированной к интервалу 0–1 и с положительной амплитудой профиля.

**Определение скорости экстремума CCF** является заключительным этапом кросс-корреляционной обработки спектров в любой из двух описанных стратегий. Будучи уже частью *интерпретации* результатов кросс-корреляционной обработки спектров, этот этап должен быть описан пользователем. Однако контекст предоставляет свой интерпретатор в виде скрипта `ccf_fit.prg`, который подбирает гауссианы и полином 3-го порядка к участкам кривой  $normCCF = f(SHIFT)$ , полученным отсечением вершины кривой на нескольких фиксированных уровнях (0, 0.3, 0.5, 0.7 и 0.9). Абсцисса экстремума является оценкой лучевой скорости звезды и, сложенная с вычисленной ранее барицентрической коррекцией EBRV, записывается в выходную таблицу результатов (обычно называемую `velores.tbl`).

Для обработки спектров спектрально-двойных звёзд, имеющих две серии линий поглощения (SB2), требуется подбор двойного профиля, описанный отдельной процедурой, имя которой даётся как параметр запуска команды корреляции `CCF/..`. Эту процедуру необходимо написать отдельно, что, имея пример `ccf_fit.prg`, не трудно сделать.

### 4.3 Использование корреляционной обработки

В предыдущем разделе описаны методы и подходы, использованные в создании процедур корреляционной обработки спектров. Практика обработки состоит, таким образом, в следующей последовательности команд:

1. Создание таблицы синтетического спектра (например `b5v.tbl`) с определённым шагом по длине волны и диапазоном, покрывающим диапазон исследуемых спектров звёзд. Этот этап во многом является решающим для успешности всей операции, особенно для ранних классов звёзд, где ошибка в подклассе может существенно изменить результирующую оценку лучевой скорости.

(a) Для необходимого 2-мерного спектрального класса выясняем значения  $T_{eff}$  и  $g$  и получаем из VALD файл данных – например, `b5v.dat`.

(b) Преобразуем файл в формат, принимаемый программой SYNTH, в оболочке (ещё не в Midas'е!):

```
$ /midas/04SEPp11.0/stdred/raduga/srv/vald2synt.sh b5v.dat
```

В результате в рабочей директории образуются два файла – `cb5v.dat` и `vb5v.dat`, первый из которых не содержит списка линий и предназначен для вычисления чистого континуума.

(c) Вычисляем синтетические спектры `*.prf`:

```
$ /midas/04SEPp11.0/stdred/raduga/exec/synth.exe cb5v.dat cb5v.prf
$ /midas/04SEPp11.0/stdred/raduga/exec/synth.exe vb5v.dat vb5v.prf
```

из которых, уже в Midas, затем делаем нормированный спектр:

```
Midas 010> @@ {rdg_prg}ccf_mkstnt.prg b5v
```

В результате в текущей директории появится таблица `b5v.tbl` с колонками `WAVE`, `SPEC` и `CONT` (в последней – использованный для нормировки спектра `SPEC` континуум). Дескриптор `EPSILON` этой таблицы содержит коэффициент потемнения к краю, используемый далее.

- (d) Уширяем спектр, полагая, что модель аппаратного контура уже доступна через скрипт `ccf_getpsf.prg` `LAMBDA`, с учётом осевого вращения, скажем, в 30 км/с:

```
Midas 011> @@ {rdg_prg}ccf_model.prg b5v.tbl 30
```

Потемнение к краю, посылаемое процедурой в скрипт `ccf_getrot.prg`, она берёт из дескриптора `EPSILON` входной таблицы. На выходе получаем таблицу `b5v30.tbl` с уширенным спектром, годным для кросс-корреляционной обработки.

Полученные модельные спектры годны для кросс-корреляционной обработки всех спектров соответствующих типов, полученных с данным прибором. Поэтому их обычно сохраняют в каталоге `srv/` контекста.

Для звёзд поздних классов создаются перечни линий для щелевой корреляции в стиле `CORAVEL`; в контексте уже есть два – `k0iii.tbl` и `f0v.tbl`.

Созданные перечни линий для `CCF/SLIT` и синтетические спектры для `CCF/SYNT` и `CCF/ALL` удобно хранить в директории `srv/` контекста, где они ищутся по данному в команде имени после поиска в текущей директории.

2. Коррелируем спектр с маской в стиле `CORAVEL` для позднего класса с написанным предварительно обработчиком профилей `sb2fit.prg`:

```
Midas 012> CCF/SLIT e_c1234.bdf f0v.tbl fit=sb2fit.prg
```

В итоге на экране появится серия сообщений о вычислении барицентрической коррекции (внимательно их просмотрите и проверьте, особенно по первому разу обработки серии наблюдений!), создании маски и кросс-коррелировании, а затем на графическом дисплее появится изображение `CCF` и кривые её аппроксимации.

3. В стиле `CORAVEL` для ранних классов для порядков с 2 по 20-й экстрагированного спектра `e_c1234.bdf`:

```
Midas 013> CCF/SYNT e_c1234.bdf b5v30.tbl ords=2,20
```

Процесс аналогичен описанному выше.

Результаты попадут в таблицу `velores.tbl` в строку, номер которой записан в ключевом слове `ROW`.

4. Прямая корреляция спектра `a_c1234.bdf` и ему подобных: создание серии сдвинутых спектров:

```
Midas 014> VSHIFT/CCF a_c1234.bdf b5v30.tbl VRANGE=-300,300 dV=10
```

В итоге получится кадр `vb5v30.bdf` в текущей директории, в котором будет записана серия синтетических спектров класса `B5V` с осевым вращением в 30 км/с для сетки длин волн `a_c1234.bdf` и диапазона скоростей от  $-300$  до  $+300$  км/с. При этом шаг по скоростям будет в 10 км/с.

5. Прямая корреляция спектра `a_c1234.bdf` и ему подобных: нормализация спектра:

```
Midas 015> NORMALIZE/SPEC a_c1234.bdf na_c1234.bdf
```

В результате должен получиться спектр с более-менее ровным уровнем континуума, корреляция которого не будет так завешивать коротковолновую область (где сигнал меньше, а скорректированный за кривую чувствительности уровень выше). Процедура нормализации непростая и требует внимания, чтобы не получить ложной переменной (“волнистости”) спектра. В режиме TABLE можно использовать таблицу “мест континуума” типа `raduga/srv/cont0v.tbl` для аппроксимации его уровня.

Собственно корреляция:

```
Midas 016> CCF/ALL na_c1234.bdf vb5v30 OUT=myvel
```

После вычисления барицентрической коррекции, для сетки скоростей, заложенной в `vb5v30.bdf`, вычислится CCF и вызовется стандартный её обработчик `ccf_fit.prg`. Результаты попадут в таблицу `myvel.tbl` в строку, номер которой записан в ключевом слове ROW.

6. Просмотр результатов после корреляции и вызовов обработчика для нуль-приближения скорости в  $-50$  км/с:

```
Midas 017> READ/TABLE velores @{ROW}
```

```
Midas 018> @s ccf_fit.prg na_c1234_ccf_vb5v30.tbl velores {ROW} -50
```

Профиль CCF будет переобработан и результаты попадут в ту же строку ROW таблицы `velores.tbl`.

Остаётся добавить, что все основные команды контекста снабжены help-файлами, содержание которых можно просмотреть стандартным образом. Например:

```
Midas 019> HELP CCF/ALL
```



## Приложение А

# Выходные файлы редукции данных спектрографа “Радуга”

Типы файлов, образующиеся в результате редукции данных сп-фа Радуга:

-----  
AFLAT.bdf - сглаженные полиномом 5-й степени экстрагированные порядки спектра ЛН - текущий профиль блеска (используется для выравнивания порядков)  
BAFLAT.bdf - то же, но ребинненные на сетку в 0.25 А  
BIAS.bdf - текущий (или последний) мастер-подложка (байес)  
BIAS.ps - его изображение в формате Postscript (X-сечение)  
BIAS\_1D.bdf - строка BIAS.bdf, из которого последний размножен  
a\_c1234.bdf - результирующий (сшитый) спектр на равномерной сетке длины волны (0.25А/пиксел) с коррекцией за кривую реакции  
a\_c1234\_ccf\_\*.tbl - кросс-корреляционная ф-я (рез-т CCF/ALL)  
back.tbl - текущая таблица положений точек между порядками, где измеряется фон (данные для сглаживания для работы команды BACKGROUND/ECHE и подобных)  
c1234\_1D.bdf - строка байеса, полученная из файла байеса c1234.fts  
c1234\_AFLAT.bdf - AFLAT для конкретного спектра ЛН c1234.fts  
c1234\_bal.bdf - баланс-спектр: результат деления экстрагированного спектра на свой же сглаженный спектр (\*AFLAT), который, после усреднения с другими, можно использовать для коррекции за "плоское поле" ПЗС  
c1234\_order.tbl - таблица положения порядков, полученная из спектра ЛН c1234.fts  
c1234\_prf.bdf - профиль порядков: результат по-колонного деления изображения c1234.fts спектра ЛН на свой сглаженный рез-т экстракции AFLAT, выражающий форму порядка спектра в данных X и порядке. Интеграл от колонки в пределах порядка равен 1 +/- индивидуальная неравномерность чувств-ти пикселей в ней  
c1234\_snr.tbl - таблица отношения сигнал/шум в порядках спектра ЛН c1234.fts, созданная raduga\_flat.prg  
c1234\_line.tbl - таблица детектированных линий спектра ЛПК в спектра и их отождествлений, в дескрипторах которой записан дисперсионный полином c1234.fts, создаваемая SEACRCH/ECHE и IDENTIFY/ECHE  
grm\_c1234.tbl - таблица-список детектированных (и корректированных) космических частиц в спектра c1234.fts, создаваемая процедурой оптимальной экстракции (rnesort.for, nesort.for). X-координаты в ней уменьшены на 10

по сравнению с оригинальными!

e\_c1234.bdf - результат экстракции спектра c1234.fts (линейной, оптимальной)

e\_c1234\_ccf\_\*.tbl - кросс-корреляционная ф-я (рез-т CCF/SYNT, CCF/SLIT)

escr\_c1234.tbl - таблица-список вычищенных косм.лучей процедурой FILTER/ECHE (результат вычитания экстракции нечищенного и чищенного кадров, преобразованный пороговой фильтрацией в список частиц и их (вычищенных) интенсивностей).

line.tbl - текущая таблица идентификации линий ЛПК и дисперсионного соотно-я

order.tbl - текущая таблица положения порядков

pipe.cat - каталог-последовательность обработки кадров (создается REDUCE/RADU opt=0,1, используется REDUCE/RADU opt=2, создается и используется REDUCE/RADU opt=3)

re\_c1234.bdf - результат экстракции спектра c1234.fts, ребинный на сетку 0.25 A

var\_e\_c1234.bdf - оценка вариации (дисперсии, а не станд. отклонения! в ед. ADU<sup>2</sup>) оптимально-экстрагированного спектра e\_c1234.bdf

variance.bdf - приближение вариации последнего входного спектра, экстрагированного оптимально.

velores.tbl - MIDAS-таблица результатов кросс-корреляционной обработки спектров.