

УДК 52-14; 51-7:004.45

ПОТОКОВАЯ ОБРАБОТКА ДЛИННОЩЕЛЕВЫХ СПЕКТРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ТЕЛЕСКОПЕ SALT

© 2022 А. Ю. Князев^{1,2,3*}

¹Южно-Африканская астрономическая обсерватория, Кейптаун, 7935, Южная Африка

²Южный Африканский Большой Телескоп, Кейптаун, 7935, Южная Африка

³Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

Поступила в редакцию 6 сентября 2021 года; после доработки 17 февраля 2022 года;
принята к публикации 18 февраля 2022 года

В работе представлена система потоковой обработки спектральных данных, получаемых в режиме «длинная щель» на многофункциональном спектрографе низкого и среднего спектрального разрешения Robert Stobie Spectrograph (RSS) Южного Африканского Большого Телескопа (SALT). Рассмотрены особенности спектральных данных RSS, обусловившие необходимость создания такой системы обработки. Сформулированы принципы реализации разработанной системы, приведено ее генеральное описание и подробно представлены этапы потоковой обработки данных. Также даны потоковые диаграммы для всех основных шагов обработки.

Ключевые слова: *методы: анализ данных — программное обеспечение: разработка*

1. ВВЕДЕНИЕ

Южный Африканский Большой Телескоп, в дальнейшем — SALT (Buckley et al. 2006, O’Donoghue et al. 2006), в силу своих конструктивных особенностей, детально описанных автором (Kniazev et al. 2019), является спектральным телескопом. В настоящее время SALT оснащен двумя спектрографами:

- (1) длиннощелевым спектрографом низкого и среднего спектрального разрешения Robert Stobie Spectrograph (RSS, $R = 300\text{--}12\,000$; Burgh et al. (2003), Kobulnicky et al. (2003)) и
- (2) фиберным эшелле-спектрографом высокого разрешения High Resolution Spectrograph (HRS, $R = 15\,000\text{--}65\,000$; Barnes et al. (2008), Bramall et al. (2012; 2010), Crause et al. (2014)).

Во время наблюдений возможен выбор спектрографа и смена режима наблюдений на нем в течение минуты; все наблюдения проводятся в сервисном режиме профессиональными астрономами.

Спектрограф RSS обладает большим набором мод наблюдений:

- 1) спектроскопия с длинной щелью;
- 2) мультиобъектная спектроскопия;

- 3) получение изображений в узких фильтрах;
- 4) узкополосная спектроскопия с использованием эталона Фабри–Перо;
- 5) спектрополяриметрия с длинной щелью;
- 6) спектроскопия высокого временного разрешения.

Наиболее часто используемым является режим спектроскопии с длинной щелью, на него приходится 90% наблюдательного времени. Особенностью данного режима является его высокая вариативность: имеется набор из шести гризм, которые доступны для наблюдений всегда, и каждая решетка может быть применена для выбора нескольких десятков положений, определяющих используемый спектральный диапазон (за исключением гризмы самого низкого спектрального разрешения, покрывающей весь диапазон). Таким образом, возможны несколько сотен вариантов спектральных установок гризм. Дополнительно к этому имеется шесть спектральных ламп для получения спектров сравнения (Ag, CuAg, Xe, ThAg, Ne, HgAg), набор из семи стандартных щелей¹, два варианта скорости считывания ПЗС-мозаики, состоящей из трех ПЗС-матриц и шести АЦП (аналого-цифровых преобразователей), по два на каждую ПЗС, и два значения рабочих уровней АЦП (ADU), а также

*E-mail: a.kniazev@sao.nrf.ac.za

¹http://pysalt.salt.ac.za/proposal_calls/current/ProposalCall.html

возможность работать с биннингом для всей мозаики от значений 1×1 до 9×9 . Таким образом, количество возможных реализаций конкретных спектральных конфигураций, а также конфигураций приемника получается очень большим. Однако, к сожалению, и это количество вариантов не является окончательным. Каждая большая техническая проверка спектрографа и/или его приемника, или техническая проблема, приводящая к необходимости технического обслуживания приемника (например, его переустановка), ведут к небольшому, но изменению геометрии мозаики. Конечно, после подобных ситуаций группа астрономов поддержки обязательно проводит набор стандартных тестов и переопределяет набор параметров, зашитых в программы первичной редукции данных (см. раздел 4). Однако параметры двумерной функции, отвечающей за калибровку длин волн в каждой конкретной спектральной конфигурации, могут слегка меняться, и это необходимо как-то отслеживать.

При этом сама по себе спектральная обработка длиннощелевых данных, полученных на RSS в определенной конфигурации, не представляет собой ничего специфического и может быть проведена с использованием стандартной методики, реализованной либо в MIDAS, либо в IRAF, либо с помощью других стандартных пакетов обработки длиннощелевых спектров.

Автор работает на телескопе SALT с момента его официального открытия и имеет огромный опыт использования его спектральных инструментов. За прошедшие годы порядка пятидесяти заявок автора на SALT были поддержаны. В рамках этих программ было получено более полутора тысяч длиннощелевых спектров со спектрографом RSS в совершенно разных конфигурациях, в зависимости от конкретной наблюдательной задачи.

Проблема быстрой и качественной обработки данных, получаемых на спектрографе RSS, встала перед автором очень давно и привела к созданию описываемой здесь системы потоковой обработки. Начиная с 2007 года автор опубликовал около сорока научных статей по результатам обработки длиннощелевых RSS-данных с помощью этой системы. Конечно, данная система не всегда существовала в представленном в этой работе виде, а изменялась и дополнялась по мере накопления автором опыта и знаний об особенностях спектральных данных, получаемых на спектрографе RSS (Kniazhev 2006)².

²Все отчеты SALT, на которые приводятся ссылки в этой статье, собраны автором в <https://www.saao.ac.za/~akniazev/pub/RSS/>. Также на часть из них см. ссылки на http://pysalt.salt.ac.za/proposal_calls/current/ProposalCall.html

Данная статья организована следующим образом. В разделе 2 кратко сформулированы основные принципы, заложенные при создании описываемого программного продукта. В разделах 3 и 4 описана система потоковой обработки (СПО в дальнейшем), используемая автором для обработки полученных на SALT данных спектрографа RSS. В разделе 5 представлена структура пакета программ.

2. ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДСТАВЛЕННОЙ СПО

Конкретная реализация СПО спектральных данных RSS была создана автором с использованием всего инструментария, который был ему знаком и являлся, по мнению автора, наиболее эффективным³:

1. В качестве языка для написания сценариев поведения всей системы использовался язык `bash-shell`, доступный на всех UNIX-системах.

2. Нижний уровень программы самой спектральной обработки написан с использованием IRAF либо PyRAF — в зависимости от необходимости применения интерактивной моды. В основном были задействованы два пакета. Автор считает, что реализация двумерной спектральной обработки в IRAF наиболее удачна, полна и охватывает все возможное количество особенностей обработки спектров, полученных в длиннощелевой моде.

3. Также использовались вставки, написанные на MCL (MIDAS Command Language), если реализация на IRAF–PyRAF, по мнению автора, оказывалась недостаточно эффективной в том смысле, как это указано выше.

4. Поскольку основным языком программирования верхнего уровня данной системы является `bash-shell`, параметры всех IRAF- и MIDAS-программ и процедур определены в текстовом файле настроек, по умолчанию имеющем имя, которое может быть переопределено при вызове. Все параметры определяются в формате переменных командного языка `shell` как «Параметр = значение» и могут также переопределяться при вызове из командной строки. Такой подход позволяет формировать различные сценарии выполнения потоковой обработки.

5. Многие шаги спектральной обработки имеют интерактивную и неинтерактивную моды. Выбор той или иной из них определяется параметром,

³Здесь под эффективностью автор понимает самые быстрые по времени создание и отладку работающих программ, используемых для получения вполне определенных результатов, в данном случае СПО-спектров.

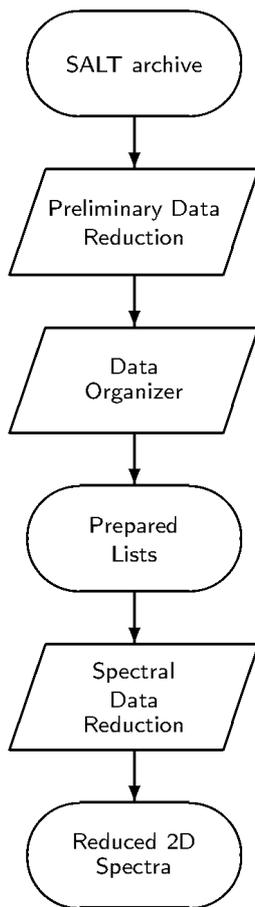


Рис. 1. Поточковая диаграмма для СПО RSS-спектров.

устанавливаемым в файле настроек, который автоматически вызывается в начале каждой процедуры. Он также имеет формат «Параметр=значение», что дает возможность все его параметры легко переводить в формат переменных языка bash-shell.

6. Главная программа позволяет обрабатывать спектральные данные, полученные на RSS по конкретной наблюдательной программе или для всех наблюдательных программ конкретной ночи наблюдений; есть также возможность обработки данных для любых последовательных промежутков времени, ограниченных определенными датами.

3. АВТОМАТИЧЕСКАЯ И ИНТЕРАКТИВНАЯ МОДЫ ОБРАБОТКИ И СПЕКТРАЛЬНАЯ БАЗА ДАННЫХ SSDB

Реализация полностью автоматической идентификации спектральной конфигурации с учетом всего возможного многообразия конфигураций представляет собой очень серьезную задачу, и поэтому

автор пошел по наиболее простому пути: для каждой новой встречающейся спектральной конфигурации требуется интерактивная идентификация спектра сравнения, которая после этого сохраняется системой в некоем аналоге базы данных этих конфигураций и используется далее в автоматическом режиме обработки при условии, что все параметры конфигурации совпадают, а мода обработки установлена в неинтерактивную. Изменения от времени параметров обработки для каждой конкретной конфигурации компенсируются наличием таких конфигурационных файлов для разных дат, при этом всегда выбирается ближайшая дата для используемой спектральной конфигурации. В дальнейшем эта база спектральных конфигураций будет упоминаться в тексте и на потоковых диаграммах как SSDB (SALT Spectral Data Base).

SSDB содержит следующую информацию:

- 1) отождествленные линии спектра сравнения для конкретной спектральной конфигурации;
- 2) параметры двумерного дисперсионного преобразования пиксельных координат в длины волн для конкретной спектральной конфигурации;
- 3) полностью подготовленные и нормализованные спектральные плоские поля для каждой спектральной конфигурации (если они ранее наблюдались и были обработаны);
- 4) выравнивающие коэффициенты для значений рабочих уровней АЦП (см. раздел 3.2);
- 5) построенные кривые спектральной чувствительности для всех наблюдаемых ранее спектрофотометрических стандартов с разными спектральными конфигурациями.

Все эти типы данных привязаны к датам наблюдений, и в случае необходимости используются калибровки данной спектральной конфигурации, ближайшие по дате.

4. ОБЩАЯ СХЕМА ОБРАБОТКИ RSS-СПЕКТРОВ

Генеральная потоковая диаграмма показана на рис. 1. Для этой диаграммы, а также для последующих потоковых диаграмм приняты следующие обозначения:

- овалы — входные/выходные данные;
- прямоугольники — определенные шаги обработки, реализуемые с использованием конкретных программ системы IRAF;
- параллелограммы — вызовы достаточно сложных процедур, в свою очередь состоящих из набора нескольких шагов;

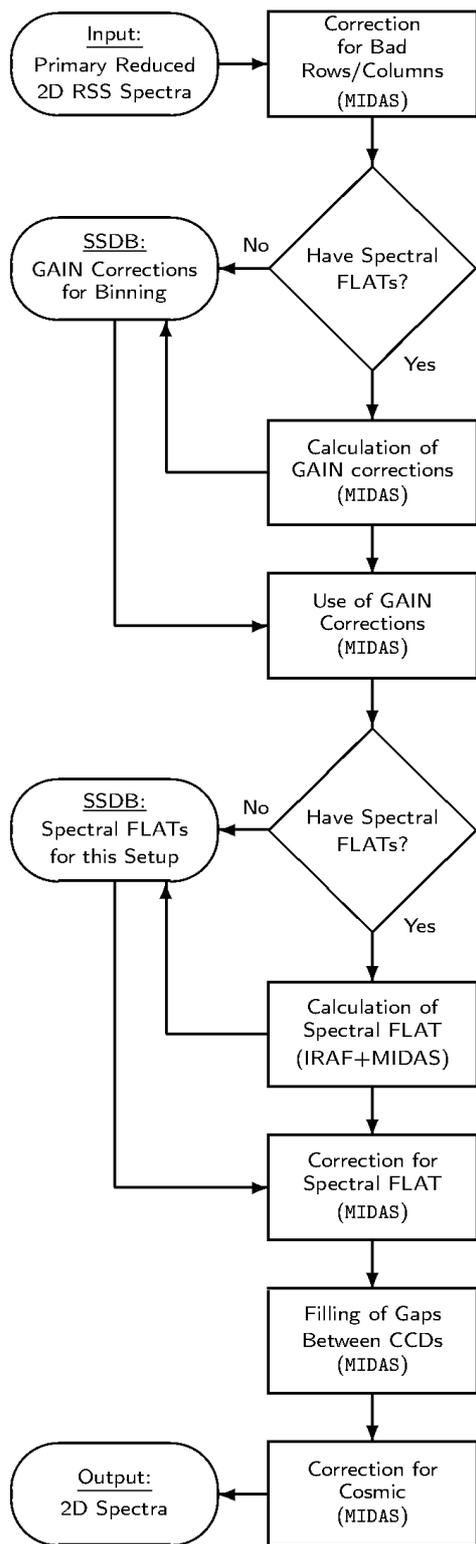


Рис. 2. Поточная диаграмма предварительной обработки RSS-спектров.

- ромбы — уход на различные ветки и используемые для этого критерии.

4.1. Первичная обработка SALT-спектров

На диаграмме рис. 1 не показана и не обсуждается в дальнейшем первичная обработка SALT-спектров, которая проводится по окончании каждой ночи наблюдений в автоматической моде и включает в себя исправление за искусственный сдвиг сигнала с каждого АЦП (bias), устранение вклада паразитного влияния друг на друга (cross-talk) разных АЦП, расположенных на одной ПЗС-матрице, и учет разных уровней АЦП/отсчет всех шести частей мозаики. В процессе этой обработки данные с каждого из шести АЦП корректируются отдельно и только на последнем этапе объединяются в общую мозаику (Crawford et al. 2010).

4.2. Предварительная обработка RSS-данных

Предварительная обработка данных RSS (Preliminary Data Reduction) включает в себя набор шагов, которые по разным причинам не делаются при первичной обработке. Кроме того, эти шаги часто бывают специфичными для обработки RSS-данных и к тому же не являются спектральными шагами обработки. Поточная диаграмма этого этапа обработки RSS-спектров показана на рис. 2. Выполняются следующие шаги:

1. *Коррекция плохих колонок и строк на ПЗС-приемнике.*

2. *Вычисление и применение выравнивающих коэффициентов.* К сожалению, у ПЗС-мозаики бывают сбои электроники, которые приводят к изменениям коэффициентов преобразования (gains). Данная проблема ведет к тому, что после первичной редукции с использованием ранее полученных gains уровни, которые должны быть одинаковыми на шести АЦП мозаики, отличаются на несколько процентов (в особо тяжелых случаях эта разница доходила до 5–6%; Kniazev 2020b). Конечно, при обнаружении этой разницы проводится новая калибровка ПЗС-мозаики, и величины gains определяются заново (Kniazev 2020a). Однако случилось, что эти скачки происходили несколько раз за ночь, и поэтому ситуацию случайных скачков величин gains приходится контролировать постоянно. Решение проблемы облегчается тем, что конструкция телескопа SALT в любом случае делает невозможной абсолютную фотометрическую калибровку. Поэтому после вычитания bias все отчеты на каждом усилителе можно умножать на

некий произвольный коэффициент, приводя одинаковые отсчеты разных АЦП к одному уровню. Автор разработал простой алгоритм автоматического вычисления выравнивающих коэффициентов для приведения отчетов разных АЦП к одному уровню, и этот алгоритм применяется как один из шагов предварительной обработки (Kniazev 2019). В случае если при наблюдении объекта был получен набор плоских полей, все спектры набора складываются и с их использованием вычисляются выравнивающие коэффициенты для данного времени и данных параметров считывания ПЗС. Эти коэффициенты применяются к остальным спектрам данного блока наблюдений и записываются в SSDB для их последующего использования при обработке других блоков наблюдений, ближайших по времени и не имеющих плоских полей для вычисления выравнивающих коэффициентов. Пример использования алгоритма показан на рис. 3. Алгоритм выравнивает уровни с точностью не хуже 0.5%.

3. *Построение спектрального плоского поля для последующей коррекции попиксельной чувствительности.* После применения выравнивающих коэффициентов спектральные плоские поля, если они наблюдались для данного наблюдательного блока⁴, складываются с медианным усреднением и нормализуются с использованием скользящей медианы. Эти нормализованные плоские поля используются для коррекции попиксельной чувствительности, что приводит к уменьшению дисперсии шума на 3–5% и является важным улучшением при получении спектров слабых объектов и/или при изучении внешних протяженных частей галактик. Поскольку попиксельная чувствительность есть функция длины волны, спектральные плоские поля будут иметь небольшие различия для разных спектральных конфигураций, параметров биннинга и параметров считывания ПЗС. Полученные спектральные плоские поля сохраняются в SSDB для применения в обработке других блоков наблюдений с совпадающими конфигурациями, ближайшими по времени и не имеющими спектральных плоских полей.

4. *Заполнение промежутков между тремя ПЗС-матрицами мозаики.* Этот шаг необходим в силу того, что на следующих шагах спектральной обработки данных, после перехода к длинам волн,

⁴Источниками света для получения плоских полей являются две лампы непрерывного спектра, установленные в калибровочной системе телескопа — едином месте, где собраны все калибровочные лампы всех научных инструментов и свет от которых подается в пучок телескопа при помощи специального зеркала, перекрывающего сигнал объекта.

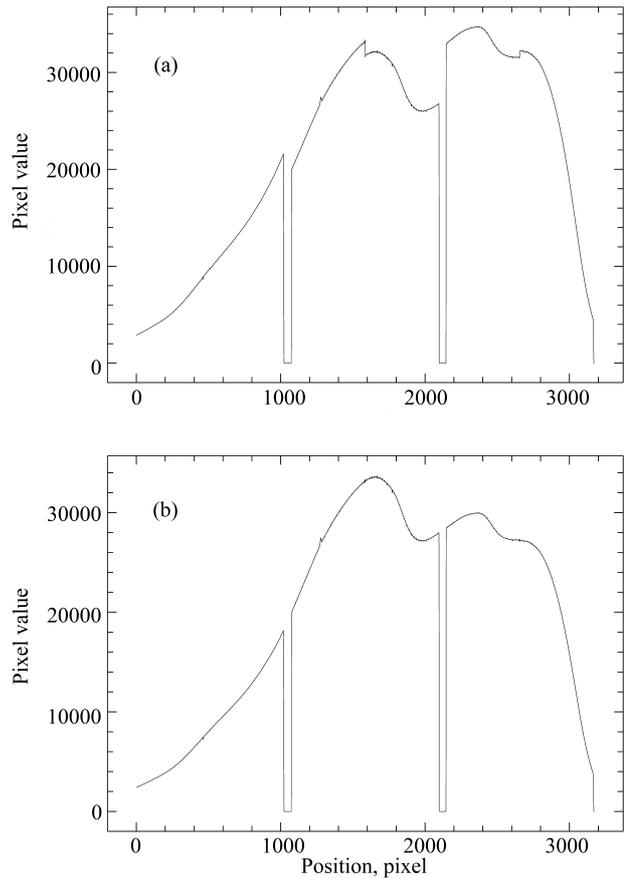


Рис. 3. Пример распределения спектрального континуума лампы плоского поля до применения выравнивающих коэффициентов (а) и после (б). Показана центральная строка мозаики. Два провала до уровня ноль, имеющиеся на каждой панели, обусловлены зазорами между тремя ПЗС-матрицами мозаики. На панели (а) четко прослеживаются ступеньки в середине каждой ПЗС (кроме самой левой), которые показывают границы между соседними АЦП. Также заметны скачки между уровнями на соседних ПЗС. На панели (б) видна плавная линия уровня после вычисления и применения выравнивающих коэффициентов. В качестве «истинного» выбирается уровень третьего АЦП, который остался неизменным.

места, приходящиеся на зазоры между ПЗС, из прямых «провалов» станут изогнутыми, что будет вносить очень большие ошибки при последующей интерполяции фона, если их не заполнить интерполированными значениями.

5. *Поиск и удаление следов космических частиц.* Дополнительно к стандартному алгоритму поиска и удаления следов космических частиц, имеющемуся в системе MIDAS, автор встроил алгоритм, описанный van Dokkum (2001) и основанный на применении фильтра Лапласа для выделения сильных градиентов интенсивности. Использование данного алгоритма, уже встроенного в

IRAF или написанного на Python,⁵ оказалось очень медленным по сравнению с его реализацией, созданной на MCL. Для повышения скорости работы данного алгоритма, а также повышения качества его работы для спектральных данных автор дополнительно использовал возможности (1) создания и топологических операций с изображениями-масками и (2) проведения фона с использованием этих изображений-масок из пакета программ AIP, встроенного автором в систему MIDAS (Kniazev 1997, Kniazev et al. 2004, Lorenz et al. 1993, Vennik et al. 1996).

4.3. Организатор данных

При любой потоковой обработке очень важна организация входных данных, которые должны группироваться по определенным признакам и представлять собой в общем случае научные данные и набор калибровок, необходимых для обработки этих конкретных данных. Типичным примером является пакет (context в терминологии MIDAS) DO (Grosbøl and Ponz 1990), который можно рассматривать как некий прототип программного продукта GASGANO⁶, используемого в настоящее время для организации данных, полученных на всех инструментах Европейской южной обсерватории (ESO), для их последующей потоковой обработки.

Поскольку получаемые спектральные данные уже организованы в наблюдательные блоки, подготавливаемые астрономами, получившими наблюдательное время на SALT⁷, то простой организатор данных был написан на языке bash-shell ОС UNIX и рассматривает очень ограниченное число стандартных ситуаций:

- 1) стандартное наблюдение, когда набору спектров объекта, полученных в одной конфигурации, сопутствует спектр сравнения;
- 2) наблюдение, когда один объект наблюдался несколько раз в одном блоке в разных спектральных конфигурациях и каждой конфигурации сопутствует свой спектр сравнения;
- 3) объект наблюдался несколько раз в ночь каждый раз в новом блоке и каждому наблюдению сопутствует свой спектр сравнения;
- 4) любой из описанных выше случаев, но спектр сравнения не снимался.

⁵<http://www.astro.yale.edu/dokkum/lacosmic/>

⁶<https://www.eso.org/sci/software/gasgano.html>

⁷<https://astronomers.salt.ac.za/proposals/phase-ii>

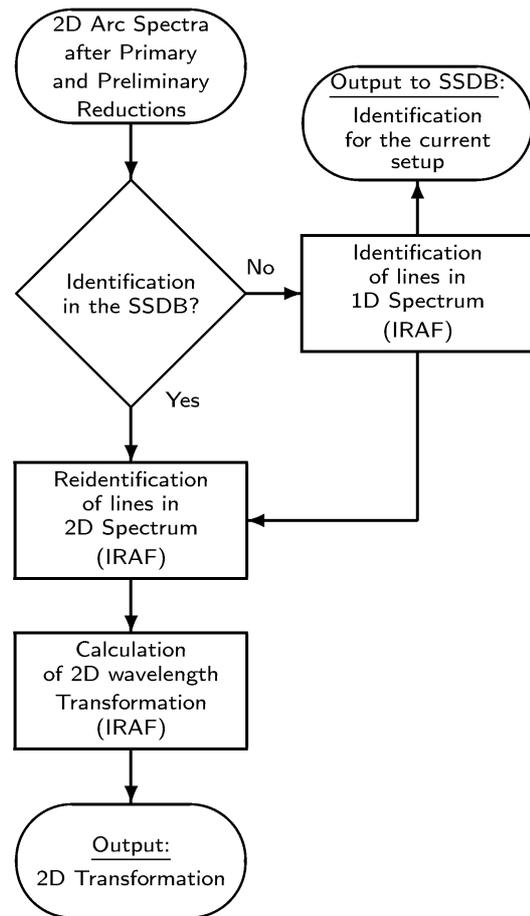


Рис. 4. Потокная диаграмма обработки двумерного спектра сравнения.

На основании анализа этих ситуаций организатор данных сортирует входные данные, сводит их в списки и подает эти списки на вход СПО спектральных данных.

4.4. Обработка спектральных данных, полученных в моде «длинная щель»

Обработку спектральных данных для каждой конкретной спектральной конфигурации можно разбить на три основных крупных шага:

- 1) обработка спектра сравнения;
- 2) обработка спектрофотометрического стандарта;
- 3) обработка объекта.

При отсутствии спектра сравнения или спектра наблюдавшегося в ту же ночь спектрофотометрического стандарта эти данные берутся из SSDB по критерию «совпадающая конфигурация, самая близкая по времени наблюдения».

Как отмечено в разделе 2 и показано на диаграммах, все используемые программы нижнего уровня для каждого из конкретных шагов обработки на этих этапах являются программами из пакета LONGSLIT (по умолчанию) и APEXTRACT (будет специально указано) стандартной системы IRAF (Kniazev 2008). Хотелось бы отметить, что обработка спектров в системе IRAF подробно описана в многочисленных документах (см., например, собранные здесь⁸), а каждая утилита имеет многочисленные параметры, детально рассмотренные как в этих документах, так и при вызове задания `help task_name` каждого пакета IRAF.

4.4.1. Обработка спектра сравнения

Потоковая диаграмма для обработки спектра сравнения приведена на рис. 4. Наблюдения спектров сравнения относятся к так называемому стандартному плану SALT-калибровок, к его разделу калибровок по запросу пользователя, проводимых в выделенное пользователю время на телескопе (UCC — User-requested charged calibrations⁹), и поэтому в подавляющем числе случаев включены в определенный наблюдательный блок.

1. Первым шагом является либо извлечение результата предыдущего отождествления из SSDb, либо, если подобная конфигурация не использовалась ранее, отождествление в ручном режиме. При отождествлении обычно извлекаются несколько центральных строк (настраиваемый параметр). Используется задание `identify`, где стандартный вызов при обработке данных с решеткой PG900 выглядит так¹⁰:

```
> identify images=refspec.fits
coordlist=cuar.dat function=chebyshev
order=5 fwidth=6. cradius=6.
```

где `refspec.fits` — имя входного файла, а `cuar.dat` — файл списка линий спектра сравнения CuAg-лампы. При использовании СПО все входные параметры настраиваются автоматически в зависимости от наименования решетки и названия лампы спектра сравнения, указанной в FITS-заголовке. Начальная интерактивная идентификация линий спектров сравнения может быть

⁸<https://www.sao.ac.za/~akniazev/pub/Manuals>

⁹Для детального рассмотрения см. разделы 5 и 7.10 документа http://pysalt.salt.ac.za/proposal_calls/current/ProposalCall.html

¹⁰При вызове всех приведенных заданий в IRAF/PyRAF предполагается, что вызов является одной строкой. Его разбиение на отдельные строки ниже делается исключительно в целях удобного форматирования. Также не стоит забывать, что все параметры могут быть установлены интерактивно, с помощью вызова `epar task_name`.

сделана, например, с использованием отождествления линий, приведенных в работе Kniazev (2009) или на странице телескопа¹¹.

Поскольку в спектрографе RSS шесть решеток, то используемое спектральное разрешение имеет диапазон R от 150 до 12 000, и финальная точность построения дисперсионной кривой сильно зависит от используемой решетки и ширины щели и варьируется от 0.5 пиксела для самых малых R до 0.1 пиксела для самых больших R . Абсолютное сравнение получаемых скоростей после обработки данных RSS показано, например, в Kniazev (2012).

2. Следующий шаг — отождествление линий по всему двумерному спектру. Используется задание `reidentify`. Для его стандартного вызова при обработке данных с RSS нужна следующая команда:

```
> reidentify reference=refspec.fits
images=refspec.fits interactive=no
newaps=yes override=no refit=yes
nlost=20 coordlist=cuar.dat verbose=yes
```

3. Последний шаг — построение двумерной дисперсионной кривой — выполняется с помощью задания `fitcoord`, стандартный вызов которого при обработке данных с RSS выглядит так:

```
> fitcoord images=refspec
interactive=yes combine=no
function=legendre xorder=5 yorder=3
```

Есть возможность проведения этого шага как в автоматическом, так и в интерактивном режимах.

4.4.2. Обработка спектрофотометрического стандарта

Наблюдения спектрофотометрических стандартов относятся к так называемому стандартному плану SALT-калибровок, к его разделу калибровок по запросу пользователя, для которых не требуется время пользователя на телескопе (UNC — User-requested non-charged calibrations). Спектральные конфигурации вместе с параметрами ПЗС-биннинга накапливаются в базе данных SALT после проведения спектральных наблюдений, требующих использования спектрофотометрического стандарта. Спектрофотометрические UNC-стандарты наблюдаются во время астрономических сумерек. Наблюдения ведутся с самой большой щелью 4" и поэтому не сопровождаются

¹¹<http://pysalt.salt.ac.za/lineatlas/lineatlas.html>

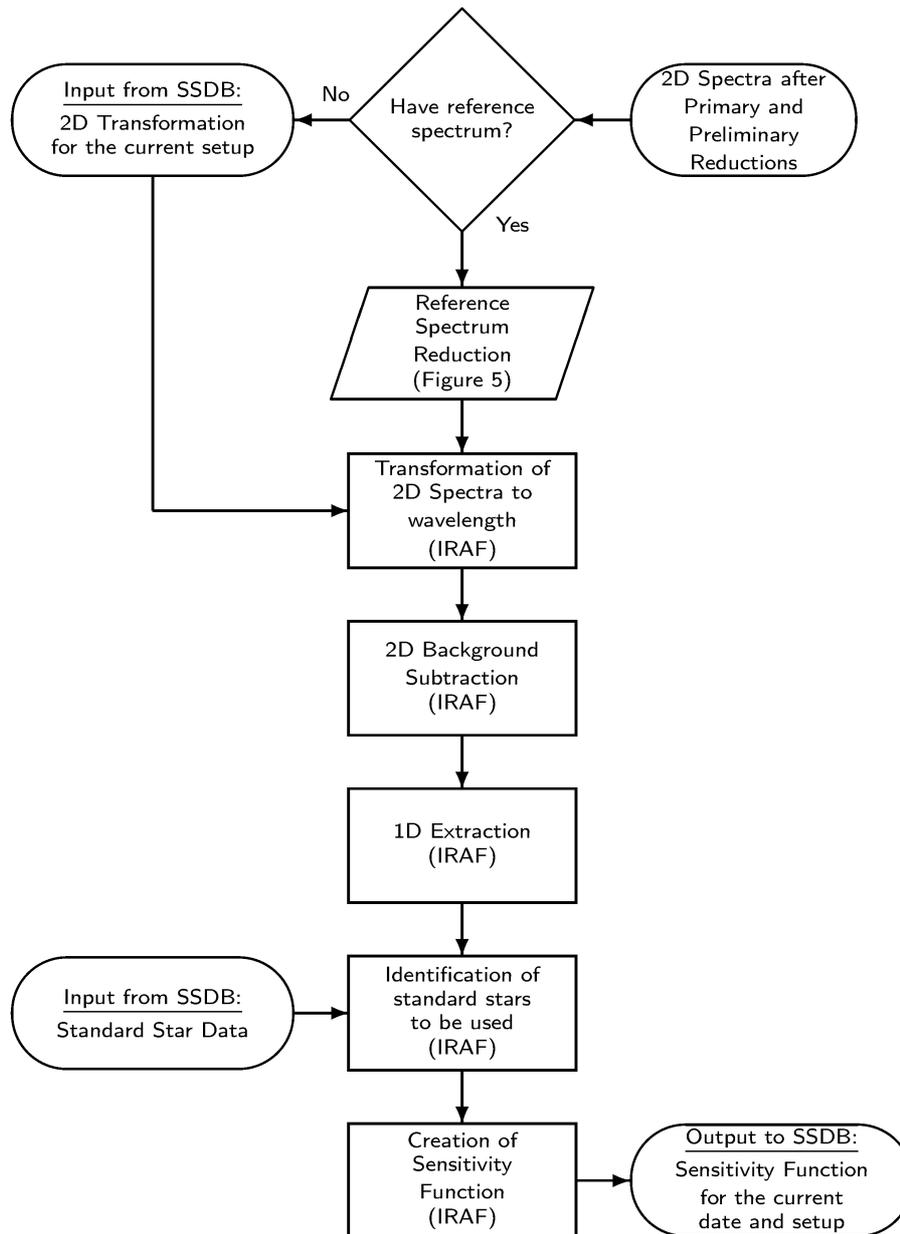


Рис. 5. Поточковая диаграмма обработки спектрофотометрического стандарта.

спектрами сравнения, так как при такой широкой щели ни о какой приемлемой точности дисперсионной кривой речи не идет, а полученный спектр будет в дальнейшем сворачиваться с окном в несколько десятков ангстрем. Тем не менее, формально говоря, пользователь может заказать такие наблюдения отдельным наблюдательным блоком, относящимся к конкретной наблюдательной программе, и сопроводить их спектром сравнения — в таком случае это будут стандартные калибровки, имеющие ранг UCC. Поскольку абсолютная калибровка на телескопе SALT недостижима,

наблюдения спектрофотометрических стандартов не привязаны к данной ночи наблюдений.

Потоковая диаграмма для обработки спектрофотометрического стандарта приведена на рис. 5. Последовательность действий такова:

1. На первом шаге выполняется двумерное преобразование к длинам волн с помощью коэффициентов ранее построенного преобразования для данной спектральной конфигурации и ПЗС-биннинга. Для этого вызывается задание `transform`, которое использует преобразование, построенное по дву-

мерному спектру сравнения с помощью задания `fitcoords`. При использовании имен из предыдущего раздела команда для RSS-обработки может быть записана следующим образом:

```
> transform input=stdstar.fits
output=stdstarw.fits fitnames=refspec
interptype=linear flux=yes blank=INDEF
x1=INDEF x2=INDEF dx=INDEF y1=INDEF
y2=INDEF dy=INDEF
```

где `stdstar.fits` — имя файла спектрофотометрического стандарта определенной спектральной конфигурации, для которой была заранее построена двумерная дисперсионная кривая «`refspec`». Попиксельная интерполяция будет линейной (для объектов с сильными эмиссионными линиями это наиболее устойчивый вариант), а поток будет сохраняться. Остальные параметры определяют область преобразования и величины шагов по обеим координатам и установлены равными «как получилось». Именно на этом этапе происходит исправление геометрии двумерных спектров (кривизны спектральных линий, возможного наклона оси дисперсии).

2. Следующим этапом является построение двумерного фона в направлении, перпендикулярном направлению дисперсии. Используется задание `background`. В случае спектрофотометрического стандарта естественно установить неинтерактивную моду:

```
> background input=stdstarw.fits
output=stdstarws.fits axis=2
interactive=no naverage=1
function=chebyshev order=4 low_rej=1.5
high_rej=1.5 niterate=5
```

где `stdstarw.fits` — двумерный спектр, преобразованный к длинам волн, а `stdstarws.fits` — этот же спектр после вычитания двумерного построенного фона. Параметр `axis` задает положение оси дисперсии, а `naverage` — число усредняемых линий/колонок в направлении, перпендикулярном направлению дисперсии, `order` — степень полинома, `low_rej` и `high_rej` — уровни «отбрасываемого» сигнала при приближении каждой линии/колонки после ее усреднения с параметром `naverage`, а `niterate` — число таких итераций. При вызове интерактивной версии все эти параметры можно менять и просматривать получающийся результат перед тем, как запустить процедуру с выбранными параметрами для всего спектра. Также в интерактивной моде можно выбирать только те участки по направлению вдоль щели, которые

будут задействованы в подобном построении фона.

3. На следующем шаге используется задание `apall` из пакета `APEXTRACT`, предназначенное для извлечения одномерного спектра из двумерного. Оно предполагает, что двумерный спектр не выровнен по направлению дисперсии в силу разных причин, поэтому ищет местоположение центра двумерного спектра с определенным шагом, фитирует все найденные центры заданным полиномом и после этого извлекает либо одномерный спектр, либо заданную часть двумерного спектра, выравнивая его вдоль направления дисперсии. В текущем случае извлекается одномерный спектр в автоматическом режиме:

```
> apall input=stdstarws.fits
format=onedspec interactive=no nfind=1
llimit=-25 ulimit=25 t_order=10
```

Здесь `stdstarws.fits` — двумерный спектр после вычитания двумерного фона, а на выходе получится одномерный спектр `stdstarws.0001.fits`; `llimit` и `ulimit` определяют границы суммирования, `t_order` — степень вписанного полинома, а параметр `nfind` — число найденных объектов (апертур). В интерактивном режиме можно изменять исходные параметры для получения наиболее правильного результата.

4. Далее полученное спектральное распределение извлеченного одномерного спектра сворачивается с тем же шагом, что и кривая абсолютного распределения энергии данного спектрофотометрического стандарта с учетом воздушной массы, на которой стандарт наблюдался, и с использованием кривой поглощения для конкретной обсерватории. Все это выполняется с помощью задания `standard`:

```
> standard input=stdstarws.0001.fits
output=sens.dat caldir=./caldir
interact=no star_name=feige110
extinct=./caldir/suzextinct2.dat
```

где `sens.dat` — выходной файл, `caldir` — директория, в которой собраны файлы распределений энергии разных спектрофотометрических стандартов, а `extinct` — файл с кривой поглощения. По умолчанию предполагается, что значение воздушной массы записано в виде параметра в FITS-шапке.

5. Последний шаг — создание кривой спектральной чувствительности, которое проводится с помощью задания `sensfunc`:

```
> sensfunc standard=sens.dat
sensitive=sens.fits interactive=yes
```

где `sens.fits` — выходной файл с кривой спектральной чувствительности.

4.4.3. Обработка спектра объекта

Потоковая диаграмма для обработки спектра объекта приведена на рис. 6.

1. Первым шагом является двумерное преобразование к длинам волн с использованием коэффициентов ранее построенного преобразования для данной спектральной конфигурации и ПЗС-биннинга. В этом случае применяется задание `transform`, которое использует преобразование, построенное по двумерному спектру сравнения с привлечением задания `fitcoords`:

```
> transform input=object.fits
output=objectw.fits fitnames=refspec
interptype=linear flux=yes
blank=INDEF x1=INDEF x2=INDEF
dx=INDEF y1=INDEF y2=INDEF dy=INDEF
```

2. Следующий шаг — построение двумерного фона в направлении, перпендикулярном направлению дисперсии. Используется задание `background`. В случае спектра объекта естественно установить интерактивную моду, чтобы контролировать получающийся результат:

```
> background input=stdstarw.fits
output=stdstarws.fits axis=2
interactive=no naverage=1
function=chebyshev order=4 low_rej=1.5
high_rej=1.5 niterate=5
```

3. Последний шаг — это исправление двумерного спектра объекта с вычтенным фоном неба за кривую спектральной чувствительности с учетом значения воздушной массы, на которой наблюдение объекта проводилось. Это делается с использованием задания `calibrate`:

```
> calibrate input=objectws.fits
output=objectwsf.fits
sensitivity=sens.fits
extinction=../caldir/suzextinct2.dat
```

Примеры исходного RSS-спектра и полностью обработанного спектра приведены на рис. 7.

4.4.4. Финальные замечания

Хочется специально отметить, что ПСО длиннощелевых спектров предназначена для проведения стандартной спектральной обработки. Именно поэтому в нее не включена процедура извлечения одномерного спектра/спектров объекта/объектов или усреднения полученных спектров и так далее — это все относится к последующему анализу обработанных данных, который должен проводить астроном, получивший полностью обработанные двумерные спектры.

5. СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО КОДА ПСО

Описываемая выше система потоковой обработки длиннощелевых спектров, получаемых на спектрографе RSS, состоит из двух отдельных пакетов программ.

Первый пакет называется `RELSA` и его исходный код доступен по ссылке https://bitbucket.org/akn_zdes_i_seichas/relsa/. Пакет предназначен для обработки длиннощелевых спектров на основе системы стандартной обработки астрономических данных `PyRAF` и требует для своей работы `UNIX`, язык `bash-shell`, а также предустановленный `PyRAF` и либо предустановленную систему стандартной обработки астрономических данных `MIDAS`, либо программы `dfits` и `fitsort` для работы с дескрипторами FITS-файлов. Краткое описание пакета и его основные идеи изложены в Князев (2006), текст которого также находится в пакете, а также в разделе 3.4 данной статьи.

Текущая версия пакета использовалась для обработки данных спектрографа RSS, данных спектрографа БТА SCORPIO (Afanasiev and Moiseev 2005), данных спектрографа TWINS 3.5-м телескопа в Calar Alto (Испания) и данных длиннощелевого спектрографа 1.9-м телескопа в Сазерланде (Южная Африка).

Однако необходимо помнить, что списки входных файлов для всех программ пакета, а также их разбиение на логические группы (объекты, спектры сравнения, спектрофотометрические стандарты) являются ответственностью пользователя.

Второй пакет называется `RSS reduction` и представляет собой надстройку над пакетом `RELSA`. Собственно говоря, он и является ПСО длиннощелевых спектров, получаемых на спектрографе RSS. Пакет требует для своей работы `UNIX`, язык `bash-shell`, а также предустановленную стандартную систему обработки астрономических данных `MIDAS` и программы `dfits` и `fitsort`. Исходный код пакета можно найти по ссылке https://bitbucket.org/akn_zdes_i_seichas/

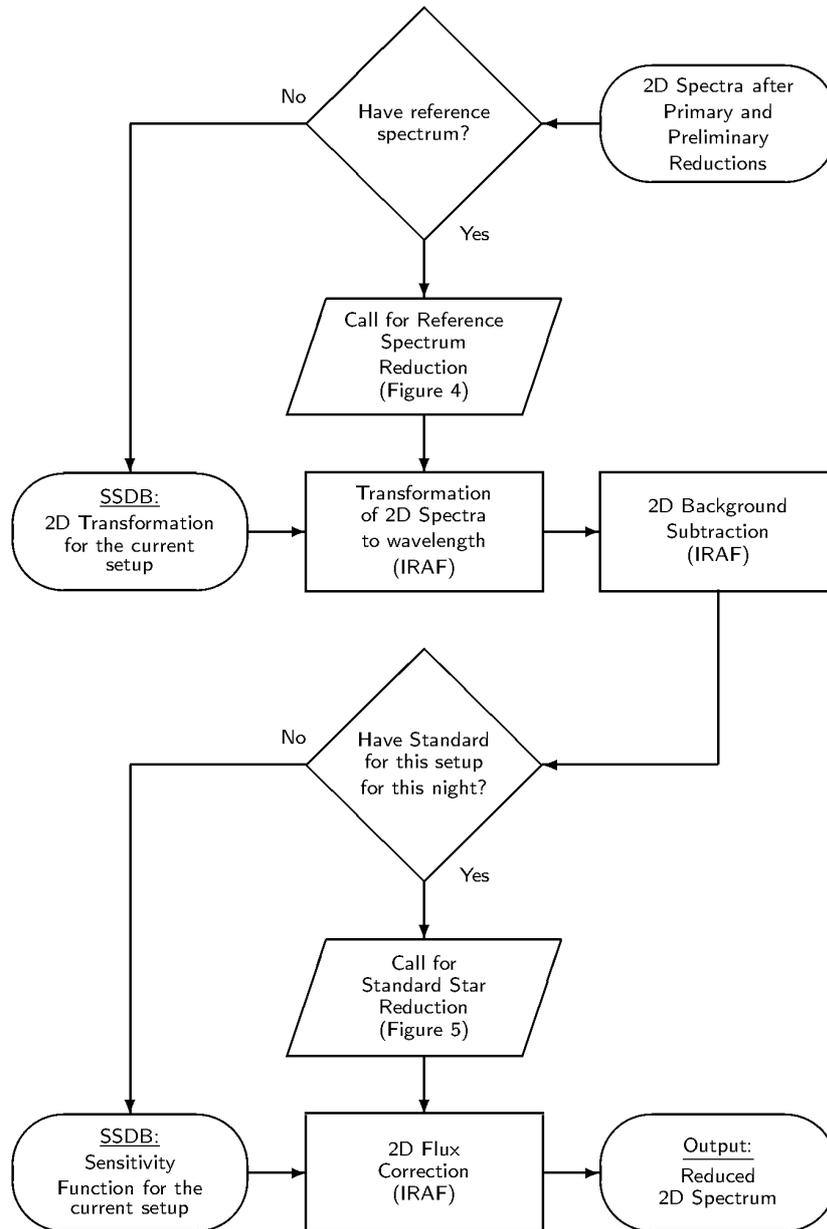


Рис. 6. Потоквая диаграмма обработки двумерного спектра объекта.

`rss_reduction/`. Его краткое описание изложено в данной статье.

Оба пакета программ распространяются без ограничений, и любой человек, установивший эти пакеты программ на свой компьютер, может менять все программы по своему усмотрению. Установка и настройка пакетов требует знаний уровня продвинутого пользователя системы UNIX, а также умения работать с системами MIDAS и PyRAF. Автор гарантирует работу обоих пакетов на своем компьютере с установленной системой Linux сборки openSUSE Tumbleweed и не несет ответственности

за его работу на других компьютерах и в других окружениях.

6. ВЫВОДЫ

Разработана и реализована система потоковой обработки наблюдательных данных, получаемых в режиме «длинная щель» на телескопе SALT со спектрографом RSS. Разработанная система позволяет учитывать огромное многообразие используемых спектральных конфигураций RSS. Данная потоковая система обработки включает следующие этапы:

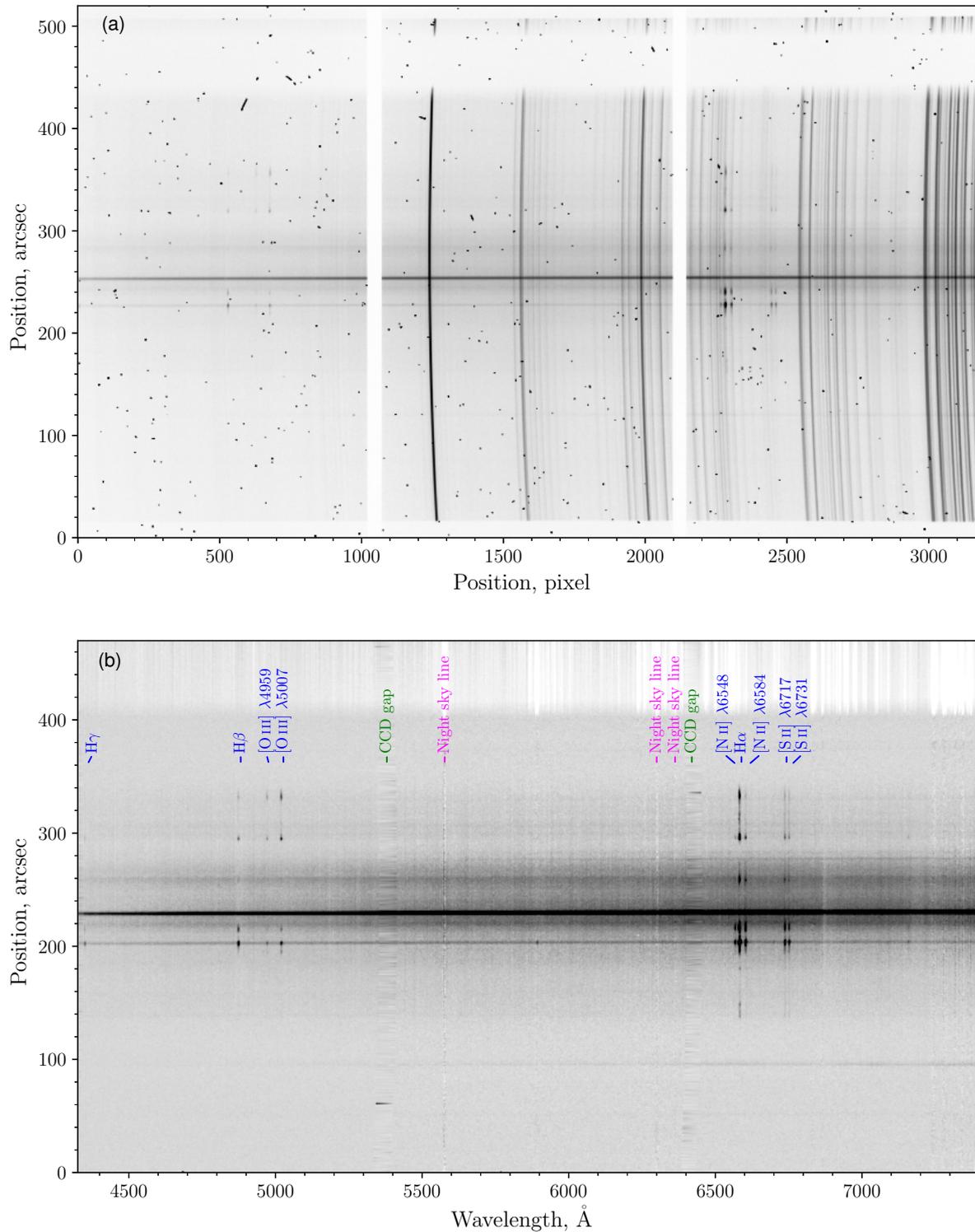


Рис. 7. Двумерный спектр H II-областей галактики NGC 2835: необработанный (a) и обработанный (b). Время экспозиции 300 с. В верхней части спектр перекрывается системой гидирования, которая пересекает щель. При обработке перекрытый участок не убирался, а просто был исключен при создании двумерного фона. Спектр галактики просматривается на протяжении примерно $200''$. Указаны все основные спектральные линии, самые яркие убранные линии ночного неба, а также промежутки между ПЗС-матрицами мозаики, заполненные интерполированным сигналом.

- предварительная обработка RSS-данных;
- обработка спектра сравнения;
- обработка спектрофотометрического стандарта;
- обработка спектра объекта.

Для оптимизации процесса обработки для большинства шагов предусмотрены интерактивная и автоматическая моды. С помощью представленной системы проведена обработка более полутора тысяч длиннощелевых спектров, полученных в рамках наблюдательных программ на SALT, которые насчитывают порядка полусотни заявок

БЛАГОДАРНОСТИ

Эту работу я посвящаю памяти моего хорошего друга, астронома и популяризатора науки Верхованова Олега Васильевича. Автор благодарит Национальный исследовательский фонд Южной Африки (NRF) за поддержку данной работы. Также автор благодарит рецензента за внимательное прочтение текста и советы по его улучшению. Спектральные наблюдения, использованные для проверки и отладки СПО RSS-спектров, были выполнены по научным заявкам автора (PI: Kniazev) на телескопе SALT:

2010-1-RSA-004,	2010-1-RSA-007,
2010-1-RSA_OTH-001,	2011-3-RSA-003,
2010-1-RSA_OTH-002,	2010-1-RSA_OTH-012,
2010-1-RSA_OTH_013,	2011-3-RSA_OTH-001,
2011-3-RSA_OTH-002,	2012-1-RSA-001,
2012-1-RSA_OTH-001,	2012-1-RSA_OTH-002,
2012-2-RSA-001,	2012-2-RSA_OTH-002,
2012-2-RSA_OTH-003,	2012-2-RSA_OTH-004,
2013-1-RSA_OTH-008,	2013-1-RSA_OTH-014,
2013-2-RSA_OTH-003,	2013-2-RSA_OTH-005,
2014-1-RSA_OTH-005,	2014-2-MLT-001,
2015-1-SCI-017,	2015-1-SCI-030,
2015-2-MLT-002,	2015-2-MLT-004,
2015-2-SCI-022,	2015-2-SCI-043,
2016-1-MLT-002,	2016-1-MLT-003,
2016-1-MLT-005,	2016-1-SCI-012,
2016-1-SCI-019,	2017-1-MLT-001,
2017-1-MLT-005,	2017-1-SCI-006,
2017-2-DDT-002,	2017-2-MLT-001,
2018-1-MLT-003,	2018-1-MLT-008,
2018-2-MLT-001,	2019-1-MLT-002,
2019-1-MLT-005,	2019-1-SCI-003,
2019-1-SCI-004,	2019-1-SCI-007,
2020-1-MLT-001,	2020-1-MLT-003,
2020-1-SCI-002,	2020-1-SCI-005.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31** (3), 194 (2005).
2. S. I. Barnes, P. L. Cottrell, M. D. Albrow, et al., *SPIE Conf. Proc.* **7014**, id. 70140K (2008).
3. D. G. Bramall, J. Schmoll, L. M. G. Tyas, et al., *SPIE Conf. Proc.* **8446**, id. 84460A (2012).
4. D. G. Bramall, R. Sharples, L. Tyas, et al., *SPIE Conf. Proc.* **7735**, id. 77354F (2010).
5. D. A. H. Buckley, G. P. Swart, and J. G. Meiring, *SPIE Conf. Proc.* **6267**, id. 62670Z (2006).
6. E. B. Burgh, K. H. Nordsieck, H. A. Kobulnicky, et al., *SPIE Conf. Proc.* **4841**, pp. 1463–1471 (2003).
7. L. A. Crause, R. M. Sharples, D. G. Bramall, et al., *SPIE Conf. Proc.* **9147**, id. 91476T (2014).
8. S. M. Crawford, M. Still, P. Schellart, et al., *SPIE Conf. Proc.* **7737**, id. 773725 (2010).
9. P. Grosbøl and D. Ponz, in *Proc. Int. Workshop on Acquisition, Processing and Archiving of Astronomical Images, Astronomical Observatory of Capodimonte, Naples, Italy, 1990*, Ed. by G. Longo and G. Sedmak (Officine Grafiche Liguori, 1990), pp. 111–123.
10. A. Y. Kniazev, Candidate's Dissertation in Mathematics and Physics (SAO RAS, Nizhniy Arkhyz, 1997).
11. A. Y. Kniazev, Long-slit reduction with SHyRAF package RELSA, SALT Report (2006).
12. A. Y. Kniazev, SALT Long-slit Data Reduction, SALT Report (2008).
13. A. Y. Kniazev, Atlas of Reference Spectra for RSS Observations, SALT Report (2009).
14. A. Y. Kniazev, RSS: Radial Velocity Accuracy using Emission Lines, SALT Report (2012).
15. A. Y. Kniazev, Automatic gain correction algorithm for the RSS mosaic CCD, SALT Report (2019).
16. A. Y. Kniazev, Gain calculation for the RSS CCD, SALT Report (2020a).
17. A. Y. Kniazev, RSS CCD mosaic gains up to now, SALT Report (2020b).
18. A. Y. Kniazev, E. K. Grebel, S. A. Pustilnik, et al., *Astron. J.* **127** (2), 704 (2004).
19. A. Y. Kniazev, I. A. Usenko, V. V. Kovtyukh, and L. N. Berdnikov, *Astrophysical Bulletin* **74** (2), 208 (2019).
20. H. A. Kobulnicky, K. H. Nordsieck, E. B. Burgh, et al., *SPIE Conf. Proc.* **4841**, pp. 1634–1644 (2003).
21. H. Lorenz, G. M. Richter, M. Capaccioli, and G. Longo, *Astron. and Astrophys.* **277**, 321 (1993).
22. D. O'Donoghue, D. A. H. Buckley, L. A. Balona, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **372** (1), 151 (2006).
23. P. G. van Dokkum, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **113** (789), 1420 (2001).
24. J. Vennik, U. Hopp, B. Kovachev, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **117**, 261 (1996).

The Pipeline Reduction of Long-Slit Spectra Obtained at the SALT Telescope

A.Y. Kniazev^{1, 2, 3}

¹South African Astronomical Observatory, Cape Town, 7935, South Africa

²Southern African Large Telescope, Cape Town, 7935, South Africa

³Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

This paper presents a description of the pipeline reduction of low and medium resolution spectral data obtained in the long-slit mode of the multi-functional Robert Stobie Spectrograph (RSS), mounted on the Southern African Large Telescope (SALT). The paper describes features of RSS that result in the creation of the pipeline. The main ideas of the developed pipeline are presented together with a general description of the pipeline and detailed description of its steps. The flow diagrams of all the pipeline steps are shown as well.

Keywords: *methods: data analysis—software: development*