

УДК 520.84:520.362

ОБРАБОТКА ПЗС-НАБЛЮДЕНИЙ СО СКАНИРУЮЩИМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ ФАБРИ-ПЕРО. III. УТОЧНЕНИЕ ШКАЛЫ ДЛИН ВОЛН

© 2015 А. В. Моисеев*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 10 августа 2015 года; принята в печать 7 сентября 2015 года

Описываются последние модификации методики обработки данных наблюдений со сканирующим интерферометром Фабри-Перо (ИФП) на 6-м телескопе САО РАН, позволяющие корректно рассчитывать шкалу длин волн при значительных взаимных смещения изучаемых объектов на интерферограммах. Приводится исследование параметров сканирующих ИФП, используемых для наблюдений в составе многорежимного редуктора светосилы SCORPIO-2.

Ключевые слова: *методики: интерферометрические — методики: обработка изображений — методики: спектроскопия изображения*

1. ВВЕДЕНИЕ

Методы панорамной (3D) спектроскопии сейчас интенсивно используются для наблюдения в оптическом и ИК диапазонах на телескопах различных диаметров. При этом наибольшее распространение получили интегрально-полевые спектрографы и блоки (IFU), использующие микролинзовые растры, волоконные жгуты или резатели. Однако даже у приборов, обеспечивающих максимальное поле зрения (MUSE [1] на 8-м телескопе VLT или PPAK-PMAS [2] на 3.6-м телескопе Calar Alto), оно составляет всего около одной угловой минуты. Это вызвано необходимостью одновременной регистрации большого количества спектров с достаточной пространственной дискретизацией. В то же время спектрометры на основе сканирующего интерферометра Фабри-Перо (ИФП) на телескопах диаметром 2–10 м оказываются непревзойденными по одновременному сочетанию таких параметров, как большое (несколько угловых минут) поле зрения с той же пространственной дискретизацией, как и для прямых изображений, и относительно высокое ($R = \lambda/\delta\lambda > 10\,000$) спектральное разрешение [3]. Плата за эти преимущества — узкий (обычно менее 50 Å) спектральный диапазон и необходимость последовательной регистрации отдельных кадров интерферограмм (сканирующий или мультиплексный спектрометр). Приходится учитывать изменение прозрачности атмосферы и

размера звездных изображений в течение длительных (часто — многочасовых) циклов сканирования. Здесь реализовано два пути: использование в качестве детектора счетчика фотонов, позволяющего многократно повторять сканирование с короткими экспозициями, или же «медленное» сканирование с матрицей ПЗС, обладающей высокой квантовой эффективностью, но конечными временем и шумами считывания. Пример современной реализации первого подхода — прибор GHaFaS на 4.2-м телескопе WHT [4] с GaAs фотокатодом и усилителем на микроканальных пластинах на входе коммерческой ПЗС. Второй подход — с классической ПЗС — позволяет использовать этот же детектор для других видов наблюдений, таких как прямые снимки и длиннощелевая спектроскопия, т.е. включить ИФП в состав многорежимного прибора — редуктора светосилы. При этом важно построить методику наблюдений и обработки данных, чтобы правильно корректировать атмосферные модуляции, вносимые при медленном сканировании ИФП. Именно этот путь реализован на 6-м телескопе САО РАН, где с 2000 г. ИФП является одним из режимов работы фокального редуктора SCORPIO [5].

Методика обработки наблюдений, получаемых с ИФП на SCORPIO, подробно изложена в предыдущих статьях серии [6, 7]. В настоящей работе мы описываем последующий прогресс в использовании этой техники на 6-м телескопе САО РАН для изучения кинематики ионизованного газа в галактических и внегалактических объектах. Так,

*E-mail: moisav@sao.ru

в 2010 г. был получен первый свет на многорежимном фокальном редукторе нового поколения SCORPIO-2 [8], включающем в себя режим ИФП. С 2013 г. такие наблюдения на 6-м телескопе проводятся только со SCORPIO-2. Были приобретены два новых сканирующих пьезоэлектрических интерферометра, почти в два раза увеличилось спектральное разрешение.

Описанию характеристик ИФП в составе SCORPIO-2 посвящена первая часть данной статьи. С появлением дополнительных технических средств и расширением круга задач возникла необходимость модификации алгоритма обработки данных наблюдений. В разделе 3 рассматриваются причины появления ошибок шкалы длин волн при смещениях наблюдаемых объектов на интерферограммах от кадра к кадру. В разделе 4 представлен способ коррекции этого эффекта, что важно для точного измерения дисперсии скоростей ионизованного газа. В заключительной части обсуждаются возможности применения разработанного метода.

2. НОВЫЕ ИФП В САО РАН

Основные параметры при наблюдениях в режиме ИФП на SCORPIO и SCORPIO-2 практически совпадают: то же поле зрения $6'1 \times 6'1$ с масштабом $0''36$ на пиксель (при считывании ПЗС с биннингом 2×2). Разница состоит в несколько лучшей чувствительности ПЗС E2V-4240 в области линии $H\alpha$ (около 95% вместо примерно 78% с матрицей EEV 42-40 со старым спектрографом). Также САО РАН приобрела у фирмы IC Optical Systems, Ltd.¹ (Великобритания) два новых сканирующих пьезоэлектрических интерферометра ET-50 с серийными номерами FS-1064 (изготовлен в 2009 г.) и FS-1081 (2012 г.). В номенклатуре SCORPIO-2 они обозначаются как IFP186 и IFP751 соответственно. В таблице приведены их основные характеристики: n — порядок интерференции на указанной длине волны, $\Delta\lambda$ — свободный спектральный диапазон между соседними порядками, $\delta\lambda$ — спектральное разрешение (FWHM контура линии калибровочной лампы), F — контраст (finesse) и n_z — число изображений (каналов), на которые обычно при сканировании разбивается спектральный диапазон. Последний параметр задается при наблюдениях так, чтобы обеспечить минимально допустимую дискретизацию, т.е. $n_z \geq 2F$.

Измерения указанных параметров проводились непосредственно на приборе SCORPIO-2 по спектру калибровочной лампы с He-Ne-Ag наполнением, отдельные линии выделялись узкополосными

Параметры сканирующих ИФП на SCORPIO-2

| Параметр | IFP186 | | IFP751 | IFP501 |
|--------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | λ 6563 | λ 5007 | λ 6563 | λ 6563 |
| n | 188 | 246 | 751 | 501 |
| $\Delta\lambda$, Å | 34.9 | 20.3 | 8.7 | 13.1 |
| $\Delta\lambda$, км с ⁻¹ | 1696 | 1216 | 399 | 598 |
| $\delta\lambda$, Å | 1.7 | 2.0 | 0.44 | 0.80 |
| $\delta\lambda$, км с ⁻¹ | 78 | 120 | 20 | 36 |
| F | 21 | 10 | 20 | 16 |
| n_z | 40 | 30 | 40 | 36 |

фильтрами. В области вблизи линии $H\alpha$ оценка $\delta\lambda$ выполнялась по линии Ne I λ 6598.95, а в области вблизи [O III] — одновременной подгонкой профилей пяти линий Ne I + Ar II в промежутке 5145–5152 Å. Фирмой-изготовителем был предоставлен график измерений коэффициента отражения пластин интерферометра R (рис. 1). Там же показаны соответствующие величины контраста, характеризующие спектральное разрешение на разных длинах волн, полученные с помощью соотношения

$$F(\lambda) = k F_0(\lambda).$$

Здесь $F_0(\lambda)$ — контраст «идеального» интерферометра (отсутствие дефектов, абсолютно плоские пластины), рассчитанный по широко известной из теории ИФП формуле

$$F_0(\lambda) \approx \frac{\pi \sqrt{R(\lambda)}}{1 - R(\lambda)},$$

а нормировочный коэффициент k подбирался так, чтоб обеспечить наилучшее согласие полученного графика как с нашими измерениями (см. таблицу), так и с данными фирмы-изготовителя ($F = 18$ на длине волны 633 нм для обоих интерферометров): $k = 0.78$ для IFP186 и 0.85 для IFP751. Рисунок 1 показывает, что можно проводить наблюдения с достаточным контрастом ($F > 10$) не только вблизи линий $H\beta$ –[O III] λ 5007 и $H\alpha$ –[S II] $\lambda\lambda$ 6717, 6731, но также в области триплета Ca II $\lambda\lambda$ 8498, 8542, 8662. Эта возможность была специально заложена для изучения кинематики звездного населения по абсорбционным линиям.

Предварительно порядок n для данной длины волны рассчитывался исходя из величины зазора между пластинами интерферометра, измеренной фирмой-изготовителем (точность измерений около 3 мкм). Далее эта величина уточнялась по измерению положения близких (разделение по длинам

¹<http://www.icopticalsystems.com/>

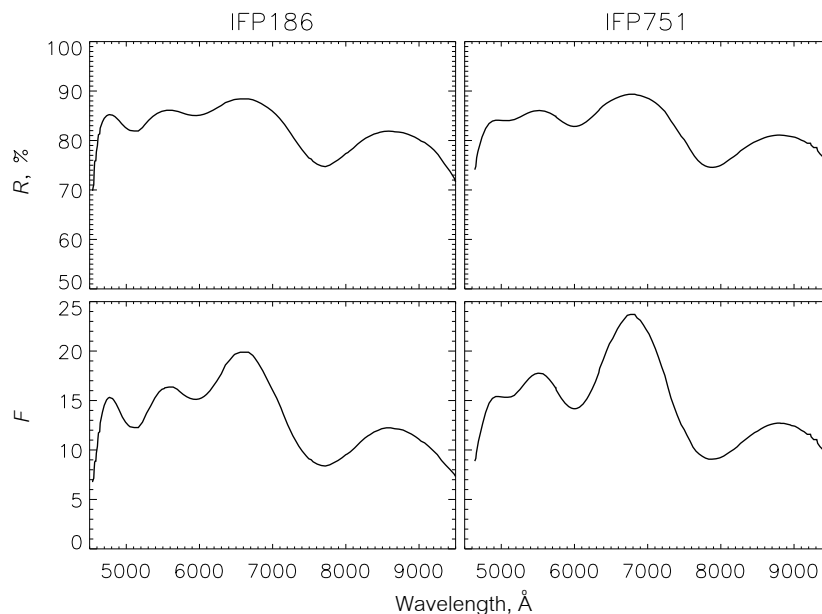


Рис. 1. Зависимость от длины волны коэффициента отражения пластин интерферометра R (вверху) и рассчитанный на ее основе контраст F (внизу). Слева: данные для интерферометра IFP186; справа: IFP751.

волн $2-3 \Delta\lambda$) линий калибровочной лампы так, чтобы измеренная после сканирования разница длины волн была максимально близка к табличной величине. При использовании имеющихся узкополосных фильтров и He-Ne-Ag лампы пары линий выбирались в диапазоне $5080-5220 \text{ \AA}$. Точность таких измерений зазора составляет $n \pm 1$ (около $\lambda/2$), что уже достаточно для дальнейшего построения шкалы длин волн при наблюдениях всего в одной калибровочной линии. Заметим, что в первых наблюдениях с IFP186 порядок интерференции был оценен как $n(\lambda 6563) = 186$, а в дальнейшем уточнен как 188, но номенклатуру изменять уже не стали.

Для сравнения в таблице также приведены параметры старого интерферометра IFP501. Он сейчас практически не используется, так как IFP751 дает почти в два раза лучшее спектральное разрешение при близком $\Delta\lambda$, а IFP186 удобнее для наблюдений слабых объектов с большим разбросом лучевых скоростей. В частности, с ним выполняются наблюдения галактик с активными ядрами в линии [O III] $\lambda 5007$.

На рис. 2 приводится оценка точности измерения основных кинематических параметров эмиссионной линии — лучевой скорости v и дисперсии скоростей σ — в зависимости от отношения сигнал шум S/N . Используется методика, аналогичная применяемой ранее в [7]. Аппаратный контур ИФП моделировался профилем Лоренца с FWHM, взятым из таблицы для случая наблюдений в линии $\text{H}\alpha$, отсюда же брались параметры шкалы длин волн ($\Delta\lambda$ и n_z). Контур сглаживался гауссианой

с заданной дисперсией σ , в полученный спектр добавлялись шумы, оценка v и σ выполнялась на основе аппроксимации профилем Фойгта. Для каждой фиксированной величины S/N проводилась 1000 независимых испытаний. На рисунке даны измерения для $\sigma = 20$ и 50 км с^{-1} , что соответствует наиболее типичному разбросу величин этого параметра в областях H II в дисках галактик (см., к примеру, [9]). Видно, что для используемых ИФП точность измерения обоих кинематических параметров лучше $2-4 \text{ км с}^{-1}$ при $S/N > 20$.

Для наблюдений с ИФП на SCORPIO-2 используются узкополосные светофильтры с шириной полосы FWHM = $13-35 \text{ \AA}$, которые выделяют узкий спектральный диапазон вокруг требуемой линии. В линиях [O III] $\lambda 5007$ и $\text{H}\alpha$ возможно проводить наблюдения для объектов с лучевыми скоростями от -300 до $13\,000 \text{ км с}^{-1}$. Набор светофильтров систематически обновляется, актуальный список представлен на web-странице прибора.²

3. ОШИБКИ ШКАЛЫ ДЛИН ВОЛН

Приводимые на рис. 2 оценки являются нижним пределом, так как относятся к идеальному случаю однородного шума, что не выполняется при наличии ярких эмиссионных линий земной атмосферы. Вычитание линий неба может приводить к артефактам в обработанном спектре. Также важно,

²<http://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio-2/>

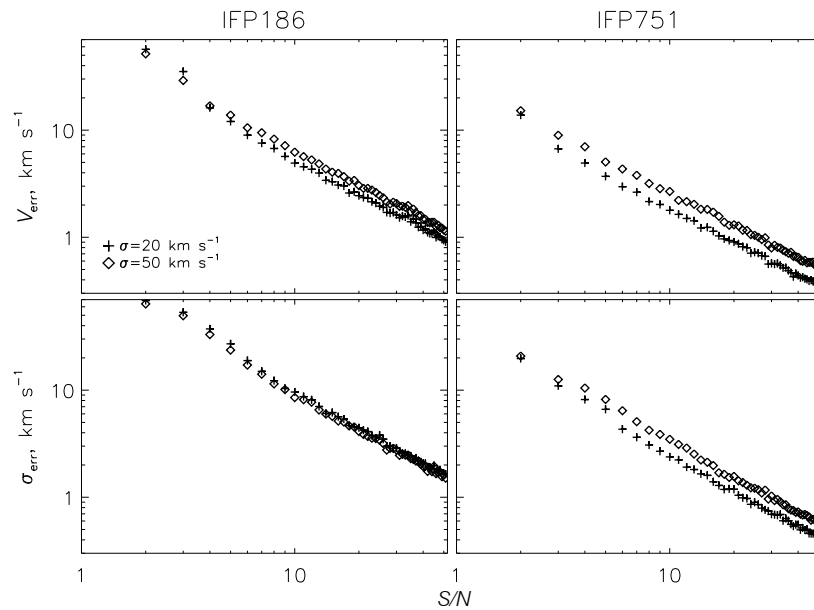


Рис. 2. Моделирование ошибок измерения кинематических параметров (по уровню 1σ) при аппроксимации линии H α профилем Фойгта: зависимость ошибки измерения лучевой скорости (вверху) и дисперсии скоростей (внизу) от уровня отношения сигнал-шум. Слева: данные для интерферометра IFP186, справа: IFP751. Крестики и ромбики показывают расчет для дисперсии скоростей 20 и 50 км с⁻¹ соответственно.

насколько точно при сканировании воспроизводится аппаратный профиль интерферометра. То, как выбор алгоритма вычитания атмосферных линий влияет на итоговый спектр, обсуждалось в [6]. Ниже рассмотрим причины появления ошибок в шкале длин волн наблюдаемых спектров, которые также зависят от техники обработки.

Далее, говоря о «канале», будем иметь в виду отдельные двумерные интерферограммы, из которых собирается наблюдаемый куб данных $I(x, y, z)$, в котором x, y — координаты на ПЗС, а z — номер канала, пропорциональный зазору между пластинами ИФП. Последовательность обработки можно разделить на следующие основные этапы (детально см. [6, 10]).

- (1) Сборка куба из наблюдаемых интерферограмм $I(x, y, z)$, включающая стандартные процедуры редукации кадров ПЗС: учет тока смещения (bias), темнового тока, «плоского поля».
- (2) Поканальное вычитание линий ночного неба.
- (3) Коррекция каналов на основе фотометрии звезд поля: учет взаимных смещений кадров, изменений прозрачности атмосферы и качества изображений.
- (4) Перевод спектров в шкалу длин волн, т.е. переход к кубу $I(x, y, \lambda)$. В случае использования счетчика фотонов вычитание фона неба можно делать после этого этапа ([11]).

Переход к шкале длин волн удобно выполнять на основе «карты фазового сдвига» $p(x, y)$, показывающей положения центра линии в кубе, состоящем из интерферограмм выделенной линии калибровочной лампы (λ_{calib}). Примеры таких карт для интерферометров высокого и низкого разрешения на SCORPIO-2 приведены на рис. 3. Величина p меняется почти квадратично с расстоянием от центра колец r . Резкие обрывы соответствуют изменению порядка интерференции. Если фазовая карта строится по калибровочной линии лампы, близкой (в величинах $\Delta\lambda$) к длине волны линии объекта, то переход $I(x, y, z) \rightarrow I(x, y, \lambda)$ на практике сводится к сдвигу каждого спектра в кубе на $-p(x, y)$ с точностью до константы.

Проблемы точной калибровки шкалы длин волн появляются, если взаимные сдвиги изображений в отдельных каналах достаточно велики. Основная причина возникновения сдвигов — гнутая в приборе, поскольку положение телескопа и параллактический угол могут сильно измениться за несколько часов наблюдений, пока выполняется сканирование всех каналов.

В каждом канале смешаны пространственная и спектральная информация, поскольку λ уменьшается с ростом r (рис. 4). Угловая дисперсия линейно растет с радиусом и не зависит от порядка интерференции. Легко показать, что

$$\frac{d\lambda}{d\vartheta} = -\lambda \operatorname{tg} \vartheta,$$

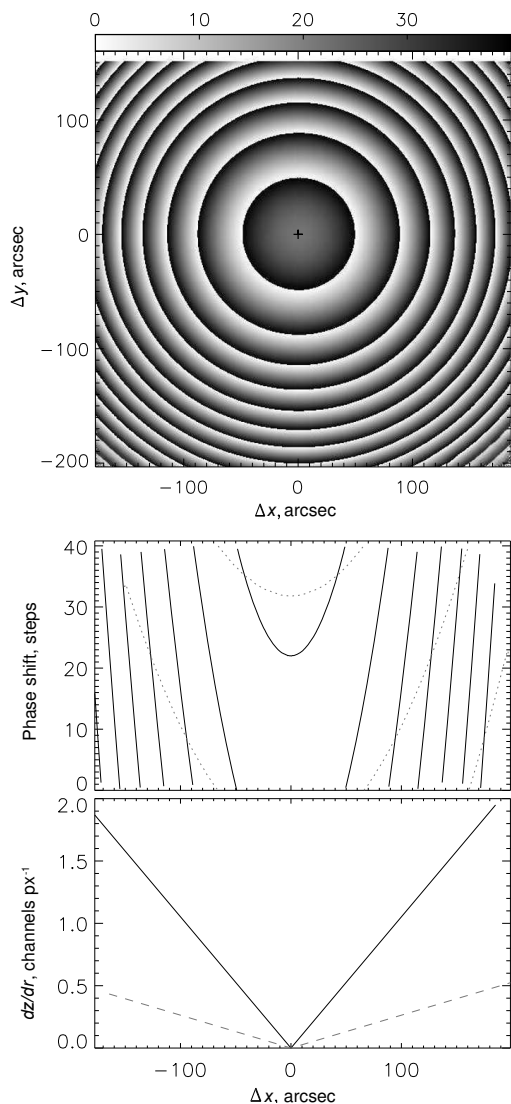


Рис. 3. Вверху: пример фазовой карты, построенной по линии калибровочной лампы Ne I λ 6598.95 в единицах спектральных каналов для IFR751. Посередине: горизонтальные разрезы фазовых карт, проходящие через центр интерференционной картины для IFR751 (сплошная линия) и IFR186 (пунктир). Внизу: соответствующие изменения угловой дисперсии с радиусом, обозначения те же.

где ϑ — расстояние от центра в угловой мере. Дисперсия, выраженная в единицах шагов сканирования, будет пропорциональна порядку интерференции:

$$\frac{dz}{d\vartheta} = \frac{n_z}{\Delta\lambda} \frac{d\lambda}{d\vartheta} = -nn_z \operatorname{tg} \vartheta,$$

что иллюстрирует нижний график на рис. 3. При наблюдениях с IFR751 взаимные смещения каналов приблизительно на один пиксель ($0''.7$) оказываются критическими даже для объектов в центральной части кадра ($r \leq 100''$). В этом слу-

чае формальное применение процедур поканальной коррекции (этап 3) приведет к смещению точки в спектре примерно на один канал.

Обычно такие смещения составляют не больше 0.5 пикселя за 2–3 часа сканирования. Но в некоторых случаях (люфт в каретке дисперсера SCORPIO) они превышали 1–2 пикселя. То, что в наблюдениях сперва снимаются нечетные, а потом четные каналы, позволяет частично усреднить эффект от монотонных со временем смещений. Но все равно эти смещения могут повлиять как минимум на ширину получаемого профиля линии.

4. КОРРЕКЦИЯ С ПОМОЩЬЮ Λ -КУБА

Чтобы избежать описанных выше проблем предложена следующая модификация алгоритма редукиции данных. Вместо двумерной фазовой карты используется куб $\Lambda(x, y, z)$ (далее — Λ -куб), содержащий значения длин волн для каждой точки в $I(x, y, z)$:

$$\Lambda(x, y, z) = [z - p(x, y)] \frac{\Delta\lambda}{n_z} + \lambda_{\text{calib}}. \quad (1)$$

Пример такого куба показан на рис. 5. На практике длины волн удобно выражать в долях шага сканирования (выражение в квадратных скобках в (1)). В каждый последующий порядок добавляется величина $z = n_z$, так что в Λ -кубе уже нет разрывов, связанных со сменой порядка интерференции.

Если в процессе первичной редукиции данных приходится выполнять смещения каналов δx , δy в кубе объекта $I(x, y, z)$, то точно такие же смещения выполняются в соответствующих каналах Λ -куба (коррекция по звездам поля, учет сдвига между кубом калибровки и тестовыми интерферограммами колец от калибровочной лампы до и после наблюдений объекта [6]). Таким образом, в каждом канале $I(x, y, z)$ сохраняются корректные длины волн, соответствующие каждому пикселю изображения, с точностью до интерполяции при сдвиге. Преобразование $I(x, y, z) \rightarrow I(x, y, \lambda)$ осуществляется путем интерполяции наблюдаемых в каждой точке (x, y) интенсивностей со шкалы Λ -куба на равномерную по длинам волн сетку.

На рис. 6 приводится сравнение измерений дисперсии скоростей ионизованного газа в трех близких карликовых галактиках из работы [9], выполненных с помощью фазовой карты — $\sigma(\text{old})$ — и методом Λ -куба — $\sigma(\text{new})$. Показаны случаи, для которых взаимное смещение каналов по техническим причинам превышало один пиксель. Как правило, $\sigma(\text{new}) < \sigma(\text{old})$, поскольку метод фазовой карты при наличии смещения приводит к дополнительному разбросу сигнала по λ и, следовательно, к

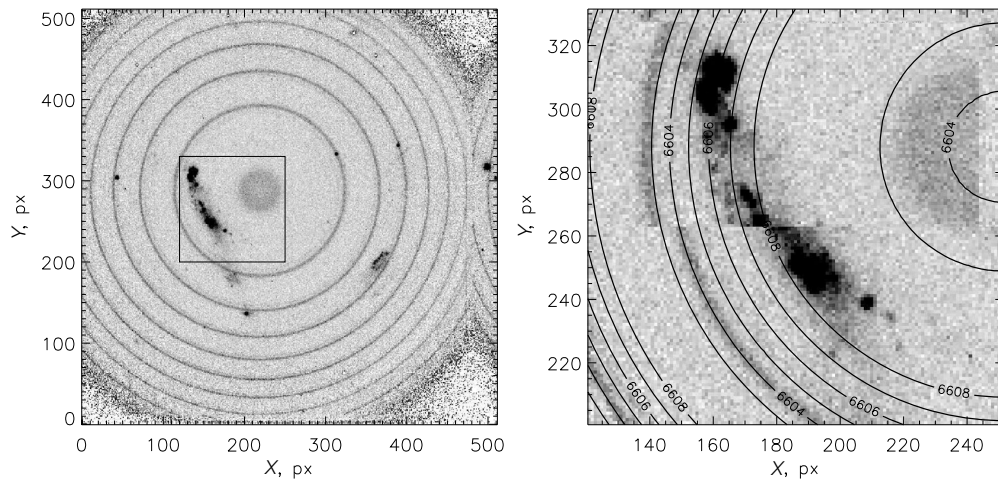


Рис. 4. Наблюдения галактики UGC 260 с помощью IFP751 на SCORPIO-2 в линии H α . Слева: пример кадра, хорошо видны как эмиссия от галактики, так и кольца от линии ночного неба λ 6604. Квадратом выделена область, показанная на рисунке справа; контурами отмечена шкала длин волн. Шаг контуров — 1 Å.

уширению измеряемых линий. Но искажения профиля линии могут быть и более запутанными, так как зависят от положения изучаемой галактики относительно оптической оси, направления и величины смещения и т.д. Поэтому в некоторых областях $\sigma(\text{new}) > \sigma(\text{old})$. Однако при взаимных смещениях каналов, не превышающих примерно 1'', систематическая ошибка измерения дисперсии скоростей, как правило, не превосходит 10 km s^{-1} , т.е. ширины инструментального профиля $\text{FWHM} \approx 2.35\sigma$. При этом систематические погрешности в измерении положения центра линии почти не возникают.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Метод калибровки с помощью Λ -куба с 2011 г. включен в программный пакет IFPWID [7], написанный на языке IDL. Он позволяет избежать искажений профиля эмиссионной линии, возникающих при смещениях отдельных каналов из-за технических проблем с системой гидрирования или с механизмами спектрографа. Хотя, как показано выше, искажения в основном сводятся к уширению профиля линии, они оказываются критичными в задачах, где важно не только получить поле скоростей, но и в деталях изучить профиль линии. Из работ, выполненных на 6-м телескопе САО РАН в последние годы, это, например, измерение дисперсии скоростей ионизованного газа в карликовых галактиках [9] или исследование истечений из молодых звездных объектов [12].

Такой метод построения шкалы длин не является принципиально новым, поскольку еще в классической статье [13] отмечалась необходимость индивидуальной фазовой коррекции каналов, если имеет место смещение центра колец. Близкая идея

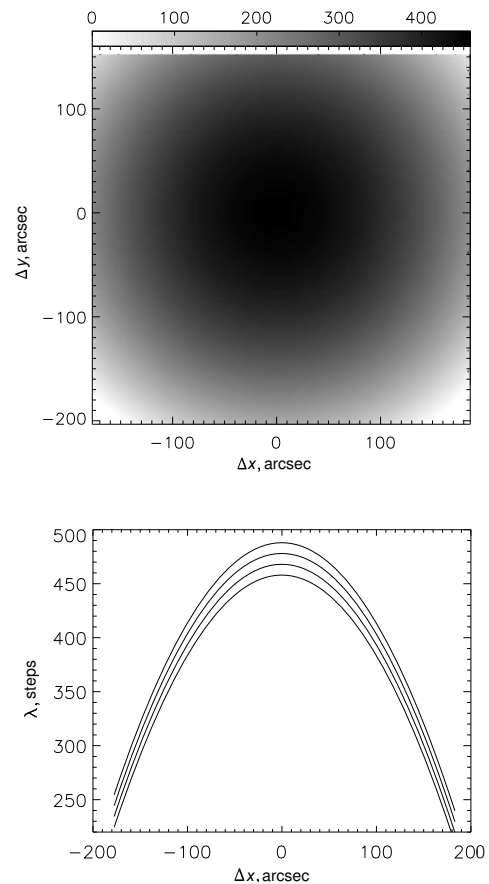


Рис. 5. Λ -куб, построенный на основе фазовой карты, показанной на рис. 3. Вверху: изображение 1-го канала куба, шкала яркости — в шагах сканирования. Внизу: примеры горизонтальных разрезов через Λ -куб, проходящих через центр колец. Снизу вверх: каналы 1, 11, 21 и 31.

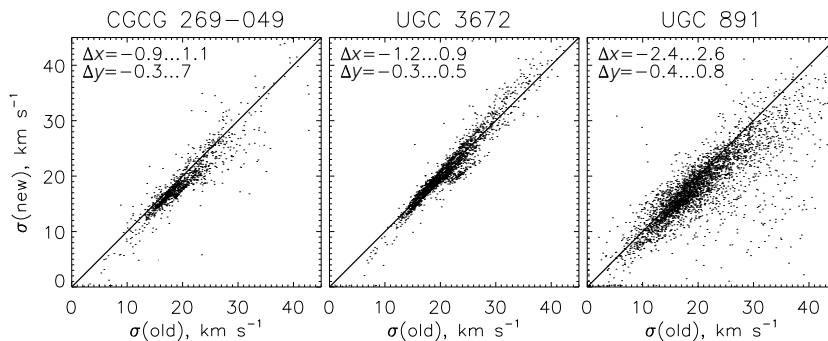


Рис. 6. Сравнение измерений дисперсии скоростей ионизованного газа по наблюдениям в линии $H\alpha$ с помощью IPR751 для трех карликовых галактиках (имена указаны сверху). По горизонтальной оси шкала длин волн строилась на основе фазовой карты $\sigma(\text{old})$, по вертикальной — с помощью Λ -куба $\sigma(\text{new})$. Точки — измерения в каждом пикселе куба данных. Сплошные линии соответствуют биссектрисе $\sigma(\text{old}) = \sigma(\text{new})$. Числа в верхнем левом углу показывают диапазон взаимных смещений отдельных каналов по x и y в пикселях относительно среднего при наблюдениях. Один пиксель соответствует $0''.7$.

используется в недавней работе Mitchell et al. [14] при анализе наблюдений с ИФП на 10-м телескопе SALT. Здесь распределение длин волн в каждом канале строится исходя из предварительного измерения по калибровочной линии (или по кольцам от эмиссий ночного неба) нескольких констант, характеризующих вид интерференционной картины (см. также [10]).

В то же время идея использование Λ -куба позволяет легко адаптировать наши программы обработки для анализа данных, получаемых с ИФП на других телескопах. В частности, эта методика была применена автором для обработки наблюдений со сканирующим ИФП на SALT [15]. Принципиальным отличием от наблюдений в САО РАН здесь является то, что из-за ряда технических ограничений на длительность экспозиции сканирование куба данных выполняется не во всем свободном от перекрытия порядков диапазоне $\Delta\lambda$, а только в той области, где ожидается расположение эмиссионной линии.

Автор надеется, что описанные в данной статье параметры интерферометров в составе SCORPIO-2, а также модификации методики обработки данных будут полезны коллегам, интересующимся изучением кинематики протяженных объектов с помощью сканирующего ИФП на 6-м телескопе САО РАН.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа проводилась при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МД-3623.2015.2 и фонда некоммерческих программ «Династия». В статье использовались данные наблюдений 6-м телескопа САО РАН, работающего при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение

№ 14.619.21.0004, проект PRFMFI61914X0004). Автор благодарен фирме IC Optical Systems, Ltd. и персонально Chris Pietraszewski за предоставление технической информации и постоянный интерес к тому, как изготовленные ими интерферометры используются в наблюдениях на БТА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Bacon, J. Vernet, E. Borisova, et al., *Messenger* **157**, 13 (2014).
2. A. Kelz, M. A. W. Verheijen, M. M. Roth, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **118**, 129 (2006).
3. J. Boulesteix, *ASP Conf. Ser.* **282**, 374 (2002).
4. O. Hernandez, K. Fathi, C. Carignan, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **120**, 665 (2008).
5. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
6. A. V. Moiseev, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **54**, 74 (2002).
7. A. V. Moiseev and O. V. Egorov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 181 (2008).
8. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Baltic Astronomy* **20**, 363 (2011).
9. A. V. Moiseev, A. V. Tikhonov, and A. Klypin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **449**, 3568 (2015).
10. S. Gordon, B. Koribalski, S. Houghton, and K. Jones, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **315**, 248 (2000).
11. O. Daigle, C. Carignan, P. Amram, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **367**, 469 (2006).
12. T. A. Movsessian, T. Y. Magakian, A. V. Moiseev, and M. G. Gevorgian, *Astrophysical Bulletin* **70**, 206 (2015).
13. J. Bland and R. B. Tully, *Astron. J.* **98**, 723 (1989).
14. C. J. Mitchell, T. B. Williams, K. Spekkens, et al., *Astron. J.* **149**, 116 (2015).
15. N. Brosch, P. Väisänen, A. Y. Kniazev, and A. Moiseev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **451**, 4114 (2015).

Reduction of CCD Observations Made with a Scanning Fabry–Perot Interferometer. III. Wavelength Scale Refinement

A. V. Moiseev

We describe the recent modifications to the data reduction technique for observations acquired with the scanning Fabry–Perot interferometer (FPI) mounted on the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory that allow the wavelength scale to be correctly computed in the case of large mutual offsets of studied objects in interferograms. We examine the parameters of the scanning FPIs used in the SCORPIO-2 multimode focal reducer.

Keywords: *techniques: interferometric—techniques: image processing—techniques: imaging spectroscopy*