

РЕДУКЦИЯ МАСШТАБНЫХ ИСКАЖЕНИЙ СПЕКТРОГРАММ, ПОЛУЧЕННЫХ С ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

В. Л. Афанасьев

Описана методика измерений и обработки спектрограмм, полученных с трехкаскадным электронно-оптическим преобразователем типа УМ-92 и предназначенных для исследования поля скоростей протяженных объектов. Вероятная ошибка определения лучевой скорости в области H_α при обратной линейной дисперсии $90-95 \text{ \AA/mm}$ составляет $20-30 \text{ км/сек}$.

The method of reduction for spectra obtained with the three-stage image-tube which are intended for investigation of the velocity field of galaxies are described. The real accuracy of radial velocity determination in H_α region is about $20-30 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ for the linear dispersion $90-95 \text{ \AA/mm}^{-1}$.

Применение многокаскадных электронно-оптических преобразователей (ЭОП) для исследования поля скоростей протяженных объектов значительно увеличивает скорость получения информации. Так, например, при умеренной светосиле камеры спектрографа (1 : 2) возможно получение спектра слабых внешних частей галактик за время около $15-20$ мин. со спектральным разрешением около 5 \AA . Однако искажения, вносимые электронно-оптической системой, затрудняют измерения, и для реализации необходимой точности определения лучевой скорости требуется тщательная редукция возникающих искажений. Для ЭОП с электромагнитной фокусирующей системой масштабные искажения могут достигать $20-30\%$ на краю поля зрения.

В настоящей работе описана методика редукций измерений спектрограмм, получаемых с трехкаскадным ЭОП УМ-92 для исследования поля скоростей протяженных объектов.

Модель искажений. Искажения, вносимые электронно-оптической системой ЭОП УМ-92, обусловлены главным образом большой анизотропной дисперсией. При этом радиальные лучи, проходящие через центр симметрии на входе ЭОП, на выходе преобразуются в «S-образные» кривые, которые в первом приближении могут быть описаны кубическими функциями координат.* Для правильного построения редукционной формулы следует также учитывать искажения, вносимые спектрографом и перебрасывающей оптикой. Мы будем учитывать aberrации не выше третьего порядка и примем известную зависимость для угловой дисперсии дифракционной решетки. Если обозначить x и y измеренные прямоугольные координаты точки на спектрограмме, λ — длину волны спектральной линии, а η — расстояние вдоль щели от центра, то в общем случае можно записать:

$$\lambda = P_3(x, y); \quad \eta = Q_3(x, y), \quad (1)$$

* Г л а з е р В. Основы электронной оптики. М., Гостехиздат, 1957. 763 с.

где $P_3(x, y)$ и $Q_3(x, y)$ — полиномы третьей степени координат. В дальнейшем будем полагать, что начало координат (x, y) совпадает с центром симметрии системы.

Для упрощения редукционной формулы учтем следующие обстоятельства:

а) реальная протяженность спектра вдоль дисперсии существенно больше его высоты;

б) необходимая точность определения расстояния вдоль щели меньше точности измерения положения спектральных линий.

Для определенности примем, что ось x направлена вдоль дисперсии. Ниточный спектр звезды, установленный в центр щели ($\eta=0$), будет искривлен, и эту кривую можно описать уравнением $Q_3[x, y_0(x)] = 0$, решением которого для малых y будет:

$$y_0(x) = \alpha + \beta x + \gamma x^2 + \delta x^3. \quad (2)$$

Отсюда, пренебрегая членами выше первого порядка, имеем формулу для вычисления расстояния вдоль щели:

$$\eta \approx y - y_0(x). \quad (3)$$

Учитывая (2) и (3), запишем редукционную формулу для определения λ в виде

$$\lambda \approx P_3(x) + P_2(x)[y - y_0(x)] + P_1(x)[y - y_0(x)]^2 + P_0[y - y_0(x)]^3, \quad (4)$$

где $P_i(x)$ — полиномы i -й степени координаты x . Первый член учитывает масштабные искажения для ниточного спектра, а последующие члены — наклон и кривизну спектральных линий по высоте щели.

Определение редукционных коэффициентов. Обычно при наблюдениях спектр лабораторного источника впечатывается на спектрограмме симметрично относительно центра. Обозначим (x_i^+, y_i^+) и (x_i^-, y_i^-) координаты i -й линии «верхнего» и «нижнего» спектров сравнения соответственно. Для малых искажений

$$|x_i^+ - x_i^-| \ll |(x_i^+ + x_i^-)/2| \quad \text{и} \quad |y_i^-| \approx |y_i^+|.$$

Обозначим:

$$x_i = (x_i^+ + x_i^-)/2; \quad y_i = (y_i^+ - y_i^-)/2; \quad x_{0i} = (y_i^+ + y_i^-)/2.$$

Для малых искажений:

$$P_k(x_i^+) \approx P_k(x_i^-) \approx P_k(x_i), \quad (k=0, 3).$$

Тогда для i -й спектральной линии спектра сравнения из (4) имеем выражения:

$$\lambda_i = P_3(x_i^+) + P_2(x_i^+) y_i + P_1(x_i^+) y_i^2 + P_0 y_i^3;$$

$$\lambda_i = P_3(x_i^-) - P_2(x_i^-) y_i + P_1(x_i^-) y_i^2 - P_0 y_i^3,$$

откуда составим систему уравнений для вычисления редукционных коэффициентов:

$$y_{0i} = \alpha + \beta x_i + \gamma x_i^2 + \delta x_i^3; \quad (5a)$$

$$\lambda_i = P_3(x_i), \quad (i=1, N); \quad (5б)$$

$$2\lambda_i - P_3(x_i^+) - P_3(x_i^-) = P_1(x_i) y_i^2; \quad (5в)$$

$$0 = P_3(x_i^+) - P_1(x_i^-) + 2P_2(x_i) y_i + 2P_0 y_i^3. \quad (5г)$$

Здесь N — число измеренных линий спектра сравнения. Уравнения (5a) и (5б) определяют «искривление» и «растяжение» ниточного спектра в центре щели, а (5в) и (5г) — наклон и кривизну линий вдоль щели. Приведенные уравнения учитывают также возможную неравномерность освещения верхнего и нижнего спектров сравнения. Для замыкания системы

уравнений в случае симметричности картины искажений относительно центра примем: $p_0 = -\delta$. Система уравнений (5а)—(5г) может быть решена последовательно методом наименьших квадратов. Отметим, что полученные нами формулы справедливы только для случая, когда начало координат (x, y) совпадает с центром симметрии системы и ось x направлена вдоль дисперсии. Практически это трудно реализовать при измерениях, но, как показывает анализ, возникающие при этом погрешности малы и учитываются редуccionной формулой (4).

Измерения и алгоритм редуccion. Полученные формулы применялись для редуccion измерений спектрограмм протяженных объектов, наблюдавшихся с ЭОП УМ-92 на спектрографе UAGS, установленном в первичном фокусе БТА. В основном измерялись спектрограммы с обратной линейной дисперсией 90—95 Å/мм. Рабочая высота щели при этом была около 1.5 мин. дуги (~5 мин. на спектрограмме), использовался участок спектра длиной 20—23 мм. Измерения проводились на координатно-измерительном приборе «Аскорекорд» и включали в себя следующие координаты:

- 1) центров линий верхнего и нижнего спектров сравнения (обычно измеряются 10—15 линий);
- 2) оптического центра;
- 3) линии ночного неба в разных точках по высоте щели;

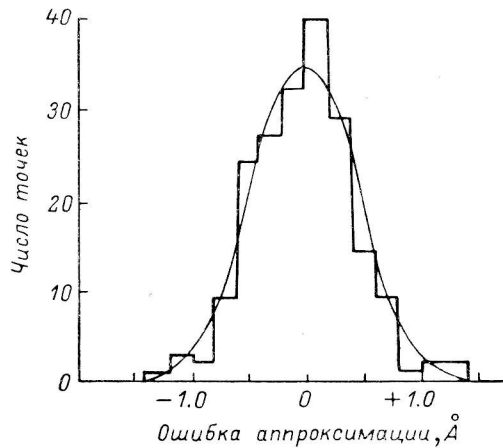


Рис. 1. Распределение ошибок аппроксимации положений линий спектра сравнения.

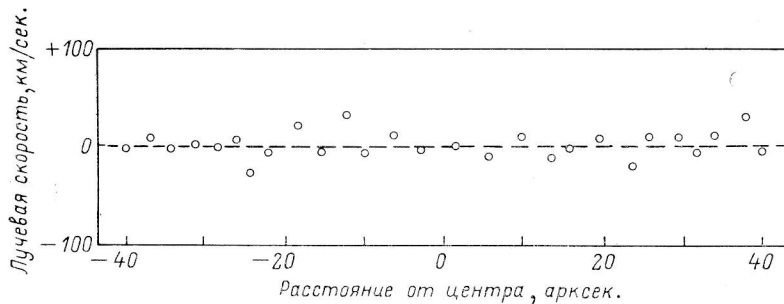


Рис. 2. Результат редуccion измерений линии ночного неба [OII] λ 6300.3 Å (спектрограмма № 52).

- 4) линий исследуемого объекта.

В дальнейшем нахождение редуccionных коэффициентов и редуccion измерений проводятся в такой последовательности.

1. По результатам измерений линий спектра сравнения вычисляются значения x_i, y_{0i} и y_i .

2. Составляется система уравнений (5а) и (5б) и решается методом наименьших квадратов относительно коэффициентов полинома $P_3(x)$ и $\alpha, \beta, \gamma, \delta$.

3. По полученным в п. 2 значениям коэффициентов составляется система уравнений (5в) и (5г), которая решается относительно полиномов $P_2(x)$ и $P_1(x)$.

4. По (4) для каждой линии спектра сравнения вычисляется длина волны. Полученная погрешность сравнивается со среднеквадратичным значением, определенным по всем линиям. Такое сравнение позволяет отбраковывать измерения с грубыми ошибками и судить о точности применяемой редуцированной формулы.

5. По измерениям линии ночного неба вычисляется формальная лучевая скорость в разных точках щели. Полученные данные наносятся на график,

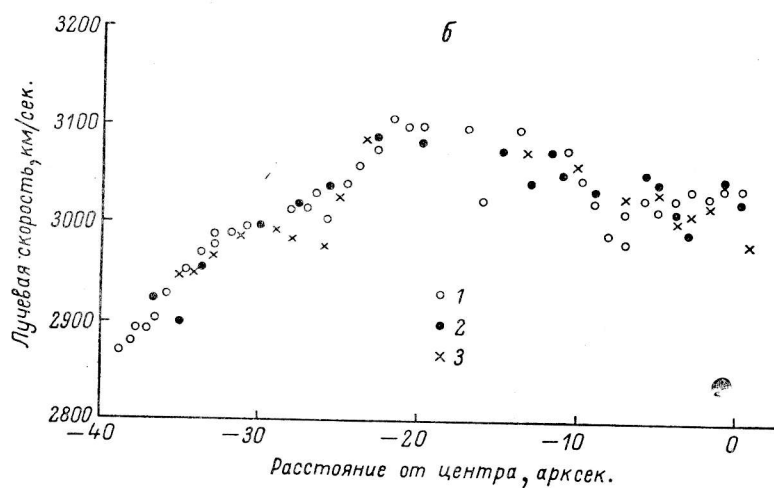
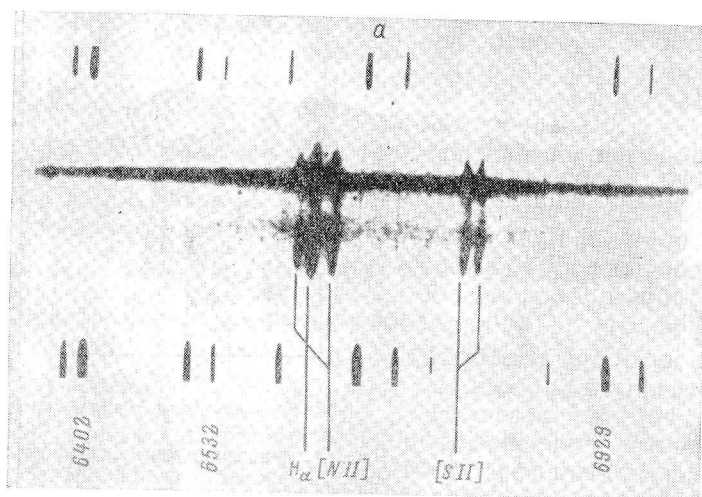


Рис. 3а. Репродукция спектрограммы № 52 (галактика Маркарян 171).

Рис. 3б. Кривая лучевых скоростей для галактики Маркарян 171, построенная по измерениям трех эмиссионных линий на спектрограмме № 52.

Измерения: 1 — по линии $H\alpha$ λ 6582 Å; 2 — [NII] λ 6583 Å; 3 — [SII] λ 6717 Å.

что позволяет судить о величине возможных гнутий спектрографа и точности редуций по высоте щели.

6. Вычисляются лучевые скорости и координаты вдоль щели для исследуемой линии.

Описанный алгоритм реализован на языке ЭЦВМ «Мир-1». Ввиду ограниченности памяти ЭВМ, а также для удобства работы и контроля программа состоит из двух частей: вычисления редуцированных коэффициентов и редукции измерений. Окончательный результат выводится на цифропечата-

ющее устройство в виде графика. Полное время измерения одной спектрограммы подготовки массивов и счета занимает 1—1.5 час.

Результаты. Для оценки применимости метода редукиций на наших спектрограммах исследовалось распределение ошибок аппроксимации положений линий спектра сравнения формулой (4). Распределение ошибок, построенное по измерениям 15 спектрограмм, приведено на рис. 1. На рисунке плавной кривой показано гауссово распределение с нулевым средним и соответствующей дисперсией ($\sigma=0.45 \text{ \AA}$), что соответствует 5 мкм на спектрограмме. Результат редукиции измерений линии ночного неба на расстоянии около 10 мм от центра показан на рис. 2. Приведенные на рис. 1 и 2 данные относятся к спектрограммам с масштабными искажениями до 15% на краю поля. Судя по нашим данным, можно утверждать, что с точностью до ошибок измерений (3—5 мкм), обусловленных низким разрешением ЭОП и фотометрическими неоднородностями, формула (4) хорошо представляет имеющуюся картину искажений.

Реальная ошибка измерения лучевой скорости оценивалась по сравнению измерений спектрограмм, полученных в разные ночи. Практически, вероятная ошибка определения лучевой скорости равна 20—30 км/сек. в области H_α при дисперсии 90—95 $\text{\AA}/\text{мм}$. Типичная спектрограмма галактики (объект Маркарян 171) и полученная для нее кривая лучевой скорости по трем эмиссионным линиям показаны на рис. 3.