

## ОБРАБОТКА НЕПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ЗВЕЗДНЫХ СПЕКТРОВ

*И. И. Назаренко, В. С. Шергин*

Описывается математическое обеспечение для фотометрического комплекса САО, позволяющее сканировать и определять форму искажений звездных спектров, строить для них характеристическую и дисперсионную кривые, складывать несколько линейаризованных по длинам волн спектров, исправлять фотометрические искажения оптической системы, рассчитывать лучевые скорости объектов.

Software for the photometric complex of SAO is described, which includes the following programs: AMD-1 scanning of the stellar spectra with  $S$ -distortion, automatical plot of the characteristic and dispersion curves, summation of intensities of linearized wavelength spectra, correction for the curve of the system reaction, calculation of the spectral line radial velocities.

Для исследования спектров слабых объектов в настоящее время широко применяются электронно-оптические преобразователи (ЭОП). Одним из недостатков ЭОП являются геометрические искажения по полю, которые трудно устранить полностью, несмотря на совершенствование оснастки ЭОП.

При обработке звездных спектров главной трудностью является учет так называемой  $S$ -дисторсии, которая приводит к искривлению спектра. Во время записи подобных спектров на обычных однокоординатных микрофотометрах отслеживание формы спектра осуществляется вручную. Предметный столик микрофотометра подвигается вдоль оси, перпендикулярной к направлению дисперсии так, чтобы спектр все время попадал на измерительную щель микрофотометра. При этом неточности ручной подвижки приводят к появлению фотометрической ошибки.

Другой недостаток традиционной обработки связан с тем, что из-за зависимости чувствительности фотокатода ЭОП от плотности ширина спектра на фотоэмульсии непостоянна. Щель постоянной высоты, с которой записывается спектр на микрофотометре, обычно выставляется по более узкому концу спектра, что занижает отношение сигнал/шум на остальной части спектра.

Появление в САО АН СССР автоматического двухкоординатного микроденситометра АМД-1, управляемого с помощью ЭВМ [1], позволило по-иному подойти к проблеме записи такого рода спектров. При выборе принципа сканирования мы старались исключить ошибки, обусловленные вышеперечисленными трудностями, возникающими при записи спектров на микрофотометрах обычного типа.

Создание на основе АМД-1 фотометрического комплекса [2], включающего в себя как стандартное математическое обеспечение ЭВМ М-400, предназначенное для разработки программ управления АМД-1 и для предварительной обработки и визуализации прямых спектров [3], дало возможность частично автоматизировать процесс первичной обработки спектров с ЭОП.

В данной статье кратко описываются следующие этапы обработки:

- сканирование на АМД-1 искаженных  $S$ -дисторсией звездных спектров, полученных на фотоносителях с прозрачной основой;
- автоматическое построение характеристической кривой;
- автоматическое построение дисперсионной кривой;
- сложение линейаризованных по длинам волн спектров;
- исправление за кривую реакции системы;
- расчет лучевых скоростей объектов.

Данная методика отлажена и применяется при обработке звездных спектров, полученных на спектрографе СП-160 в первичном фокусе 6-метрового

телескопа, и представляет собой комплекс программ, написанных для ЭВМ М-400 и СМ-4 на языках Ассемблер и Фортран-4.

**Сканирование искривленных спектров.** При сканировании спектр объекта пересекается рядом параллельных строк поперек дисперсии. Каждая строка начинается и кончается на участках фона с обеих сторон от спектра, не захватывая спектры сравнения. Расстояние между строками и их длина постоянны и задаются с терминала. Плотности в строке считываются с заданным шагом по координате и заносятся в память машины. Программа анализирует эти данные и по величине градиента оптической плотности определяет границы между спектром и фоном. По внешним частям строки за пределами спектра определяется уровень фона под спектром и все отсчеты в спектре выше этого уровня переводятся в интенсивности и суммируются по формуле  $\sum_k (I_k - I_\phi)$ , где  $I_k$  — интенсивность  $k$ -го отсчета в строке,  $I_\phi$  — интенсивность фона в строке. То есть мы получаем суммарное значение интенсивности в строке для данной длины волны. Таким образом, одна строка в данном методе аналогична одному отсчету при обычной записи вдоль дисперсии.

Одновременно в каждой строке определяется ордината середины спектра методом центра тяжести по формуле  $y(n) = \sum_i h_i / \sum_i D_i$ , где  $h_i$  — номер отсчета в строке,  $D_i$  — соответствующая ему плотность,  $n$  — номер строки. Используя величины  $y(n)$ , программа вычисляет расстояние, на которое надо подвинуть предметный столик АМД, чтобы центр спектра совпал с серединой строки.

Совокупность  $y(n)$  дает форму спектра. По найденной форме после фотометрирования спектра объекта сканируются спектры сравнения. Результаты сканирования спектра объекта, фона и спектров сравнения выдаются на внешний носитель информации.

**Построение характеристической кривой.** Программа автоматизированного построения характеристической кривой предназначена для облегчения процесса получения кривой и представления ее в форме, пригодной для использования на ЭВМ. Оцифровка исходных данных калибровочной шкалки возлагается на пользователя программы. Он задает программе относительные значения интенсивности калибровочных полей, соответствующие им значения оптической плотности в каждом разрезе шкалки и плотность вуали. Задача программы — свести наборы данных (разрезы шкалки) в один, сдвигая их вдоль оси интенсивности, и в полученном множестве точек провести кривую, задающую соответствие между плотностью и интенсивностью. Полученная кривая выводится на внешний носитель информации в виде таблицы значений интенсивностей для плотностей от 0.01 до 5.11  $R$  через 0.01  $R$ .

В основу программы положен принцип уточнения некоего исходного соответствия  $D \rightarrow I'$  по заданным разрезам шкалки. Для этого в программе имеется таблица, задающая это соответствие. Если в эту таблицу записать действительную характеристическую кривую исследуемого фотоматериала, то при переводе с ее помощью исходных данных из системы  $(I, D)$  в систему  $(I, I')$  должны получиться наборы точек на плоскости  $(I, I')$ , которые хорошо аппроксимируются прямыми линиями. Если же таблицу первоначально заполнять некой «похожей» кривой (представителем семейства кривых), то можно ожидать, что на плоскости  $(I, I')$  можно будет пользоваться для аппроксимации полиномами 1—3-й степени. Программа аппроксимирует каждый разрез прямой линией  $I = A I' + B$  и сводит их, используя значения коэффициентов  $A$  и  $B$ . Совокупный набор данных аппроксимируется полиномом 2-й или 3-й степени. С помощью полученных коэффициентов полинома таблица соответствия пересчитывается (уточняется). Уточненная таблица должна линеаризовать обрабатываемые разрезы лучше, чем исходная. Описанный процесс уточнения может быть повторен итеративно.

Программа, основанная на таком принципе, может быть адаптирована на любую форму характеристической кривой путем первоначального заполнения таблицы соответствия  $D \rightarrow I'$  кривой нужного типа.

Работа с программой осуществляется в диалоге через терминал СМ-4. При вызове программ на экране терминала индицируется краткая инструкция.

Таблица соответствия первоначально заполняется по формуле преобразова-

ния Бэйкера  $\lg I' = \lg(10^D - 1)$ , что аналогично методу, предложенному в [4]. Этого достаточно для большинства используемых фотоэмульсий. Значения плотностей в разрезах предварительно заносятся на перфоленту. Можно обрабатывать 1—15 разрезов по 3—30 точек. Выполняются две итерации уточнения таблицы. В первой используется полином 2-й степени. После этого отбрасываются ошибочные точки, отклоняющиеся более чем на 3  $\sigma$ . Вторая итерация заканчивается аппроксимацией полиномом 3-й степени. В уточненной таблице делается продолжение линейной части. При этом область  $D > 1.80$  отбрасывается и вместо нее берется прямая, продолжающая участок  $1.0 < D < 1.8$ . Это оправдано при малом количестве и плохой надежности точек, соответствующих большим плотностям, так как при этом аппроксимация участка передержек носит достаточно произвольный характер. Окончательная таблица выводится на печатающее устройство и выдается на внешний носитель информации для дальнейшего использования. Эта же программа может использоваться и для получения на внешнем носителе характеристической кривой, построенной самим наблюдателем (ее можно представить в виде одного разреза с максимальным числом точек). На рис. 1 показаны характеристические кривые, построенные данной программой и вручную. Согласие между ними достаточно удовлетворительное.

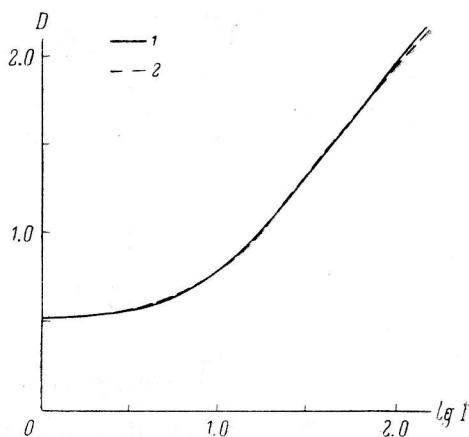


Рис. 1. Пример построения характеристической кривой.

1 — машинное построение (СМ-4); 2 — ручное.

**Построение дисперсионной кривой.** Программа автоматизированного построения дисперсионной кривой разработана для применения в специфических условиях обработки больших серий однотипных спектров, полученных с помощью ЭОП.

Под однотипностью понимается постоянный рабочий диапазон длин волн и постоянство условий, влияющих на геометрические искажения ЭОП.

Любой метод построения дисперсионной кривой подразумевает решение двух самостоятельных задач: во-первых, отождествление спектра сравнения для получения набора точек  $\{x_i, \lambda_i\}$  и, во-вторых, аппроксимация этих точек гладкой кривой  $\lambda = \lambda(x)$ . Каждая из этих задач решается, исходя из особенностей обрабатываемого материала. Для низкодисперсионных спектров, снятых с помощью ЭОП с большими (и к тому же меняющимися) геометрическими искажениями, очень трудно подобрать надежный алгоритм автоматического отождествления, не использующий иной априорной информации, кроме длин волн реперных линий.

Если в большой серии однотипных спектров промерить один из них и построить приближенную таблицу  $\{x_0^i, \lambda_i\}$ , будем называть ее маской, то наложение этой маски на конкретный спектр с целью отождествления реперных линий и нахождения их точных координат можно вполне возложить на машинную программу.

Пусть  $S(x)$  — запись (скан) спектра сравнения, а  $\{x_i^0\}$  — позиции линий в маске. Формула  $\alpha x_i^0 + x_0$  задает множество линейных модификаций маски. Рассмотрим функцию  $F(\alpha, x_0) = \sum_i S(\alpha x_i^0 + x_0)$ . При совпадении модифицированной маски со спектром эта функция должна давать по крайней мере локальный максимум. Определение значения  $F$  заключается в суммировании некоторых элементов массива  $S$ , указываемых текущей маской. Одно из обязательных требований при составлении маски — вносить в нее все значительные линии в спектре сравнения, даже если это бленды. «Плохим» линиям приписывается  $\lambda_i = 0$ . Это означает, что линия не реперная и используется лишь для отождествления. Значения  $x_i^0$  не обязательно получать очень точно:  $\pm 10$  мкм вполне достаточно. При малом числе линий ( $< 10$ ) функция  $F$  может давать ложные максимумы. Но с увеличением числа линий (до 15—20) и при разумных грани-

цах вариаций  $\alpha$  и  $x_0$  вероятность такого ложного совпадения маски со спектром можно не принимать во внимание. Для определенности считается, что маска сделана с запасом и всегда охватывает скан спектра сравнения (если это выполнить трудно, то в начало или конец маски можно вставить фиктивные линии). Перебор по параметру сдвига  $x_0$  осуществляется от совпадения левых концов маски и скана до совпадения правых. Количество изменений масштаба  $\alpha$  запрашивается через терминал. После нахождения максимума функции  $F$  исследуются участки спектра (порядка реальной ширины линий) вблизи точек, указанных модифицированной маской. Рассматриваются уже только реперные линии ( $\lambda_i=0$ ). Если в указанном месте обнаруживается пик достаточной величины, то берется его верхняя часть (выше 0.6 амплитуды) и по ней обычным методом

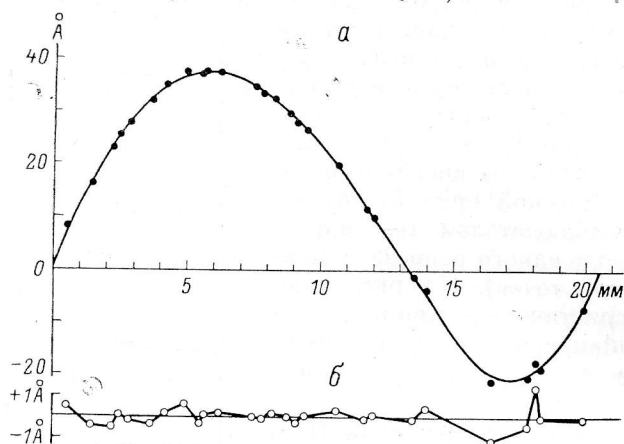


Рис. 2. Пример построения дисперсионной кривой.

$a$  — кривая поправок длин волн к прямой линии, соответствующей постоянной дисперсии  $(\lambda_{нач}-\lambda_{кон})/x_{нач}-x_{кон}$ . По оси абсцисс указано расстояние от начала записи спектра, мм, по оси ординат — поправка, Å;  
 $b$  — величины невязок, Å.

центра тяжести определяется значение  $x_i$  линии. Вместе с соответствующим  $\lambda_i$  оно записывается в таблицу отождествления. Этот способ обработки линий надежней всего работает при нулевом уровне фона по всему спектру. Для снимков с ЭОП уровень фона может несколько меняться вдоль всего спектра, поэтому в начале программы каждый скан может быть обработан с целью выделения и вычитания функции фона. Применяемый при этом алгоритм аналогичен алгоритмам проведения уровня непрерывного спектра.

По окончании процесса отождествления таблица  $\{x_i, \lambda_i\}$  выводится на печатающее устройство. Для построения по ней гладкой зависимости  $\lambda(x)$  в программе применено сглаживание набора точек симметричным, с асимптотически сходящимися к нулю краями окном  $P(x, B)$ , где  $B$  — параметр ширины окна. Сглаживание выполняется полиномом 3-й степени. От сглаживания сверткой с окном оно отличается тем, что  $P(x, B)$  интерпретируется как весовая функция в аппроксимации по методу наименьших квадратов. Конкретно, если нужно получить значения  $\lambda(x)$  в окрестности точки  $x_0$ , набор  $\{x_i, \lambda_i\}$  аппроксимируется полиномом, причем каждой точке приписывается вес  $P_i = P(x_i - x_0, B)$ . Полином 3-й степени выбран из-за того, что он «похож» на реальную кривую, т. е. отдельные участки должны хорошо им аппроксимироваться. Параметру сглаживания  $B$  задается с терминала. При его увеличении аппроксимация стремится к обычной, 3-й, степени, а при уменьшении — к ломаной линии, проходящей через все точки.

Максимальная длина скана 4000 отсчетов, максимальный размер маски 50 элементов. Дисперсионная кривая может быть получена как по одному спектру сравнения, так и по обоим, расположенным с двух сторон от спектра объекта. В последнем случае они последовательно отождествляются и из двух таблиц отождествления строится одна, в которой  $x_i$  пересчитаны (линейной интерполяцией) для местоположения спектра объекта.

Построенные этой программой дисперсионные кривые сравнивались с кри-

выми, построенными вручную. В последнем случае положение линий в спектре измерялось на астроспидометре. Дисперсия точек на машинной и ручной кривых не превышала  $0.3 \text{ \AA}$  в центральной части спектра и  $0.5 \text{ \AA}$  на краях. Различие форм обеих кривых было в этих же пределах. В настоящее время лучевые скорости считаются по линиям, расположенным в центральной части спектра, что дает ошибку в определении лучевой скорости не более  $20 \text{ км/с}$ .

**Суммирование спектров.** После получения дисперсионной кривой каждому отсчету в спектре приписывается соответствующая длина волны. Затем массив данных линейризуется, т. е. пересчитывается через заданный постоянный шаг в длинах волн, при этом между соседними измеренными точками производится линейная интерполяция. Линейризованные спектры можно суммировать. Пример суммирования семи спектров звезды SU UMa приведен на рис. 3.

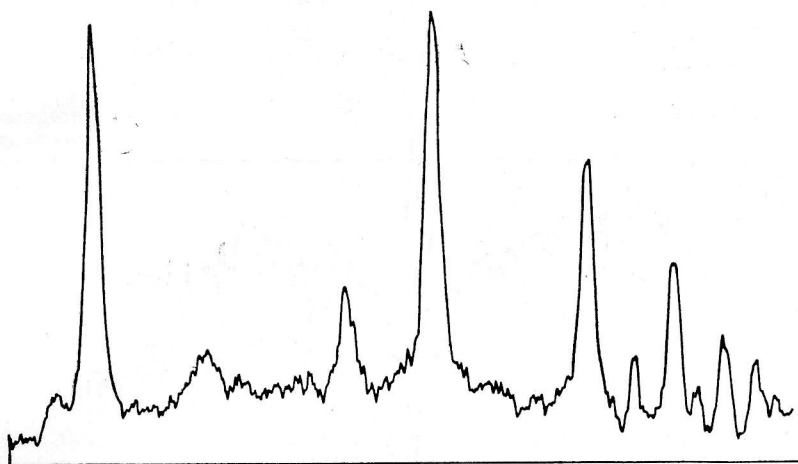


Рис. 3. Пример сложения семи линейризованных по длинам волн спектров.

**Учет искажений.** Регистрируемое распределение энергии исследуемого объекта искажено влиянием оптического тракта. Для получения истинного соотношения интенсивностей в спектре необходимо учесть эти искажения. Это делается с помощью так называемой кривой реакции системы. Спектр фотометрического стандарта обрабатывается аналогично спектру объекта и кривая реакции  $\varphi(\lambda)$  определяется из формулы  $I_n(\lambda) = I_{\text{ист}}(\lambda) \varphi(\lambda)$ , где  $I_n(\lambda)$  — наблюдаемое распределение энергий,  $I_{\text{ист}}(\lambda)$  — истинное распределение, взятое из литературы. Функция  $\varphi(\lambda)$  далее используется для коррекции распределения энергии в спектрах исследуемого объекта.

**Определение лучевой скорости.** После того как каждому отсчету в спектре приписана соответствующая длина волны, могут быть вычислены положения центров спектральных линий и по ним определены лучевые скорости  $v_r$ .

Пользователь программы отмечает спектральную линию путем задания номера отсчета точки, наверняка принадлежащей данной линии и расположенной достаточно далеко от ее вершины. Программа находит на противоположном крыле линии точку с близкой интенсивностью, выделяя, таким образом, используемую часть линии. В программе величина  $V_r$  получается одним из двух способов:

1) указанная линия сглаживается и пересекается рядом параллельных хорд, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга. Находятся середины хорд и соответствующие им величины лучевых скоростей. Далее вычисляется средняя лучевая скорость  $V_r$  либо по всем полученным значениям, либо по хордам, расположенным в верхней части линии. Все величины лучевых скоростей выдаются на печать;

2) лучевая скорость вычисляется для центра линии, найденного методом центра тяжести.

Лучевые скорости, определенные вышеописанными способами и измеренные на астроспидометре, различались в пределах  $10 \text{ км/с}$ .

На любом этапе работы возможна визуализация всех промежуточных результатов на двухкоординатном планшетном графопостроителе и графическом дисплее.

**Заключение.** Результаты панорамного сканирования сравнивались с результатами обычного прямолинейного сканирования на АМД-1 и микрофотометрах ИФО-451 и шнельфотометре фирмы «Карл Цейс». Для этого использовались короткие участки спектров, полученные при помощи ЭОП и высокодисперсионные прямолинейные спектры, полученные на ОЗСП. Сравнение показало, что

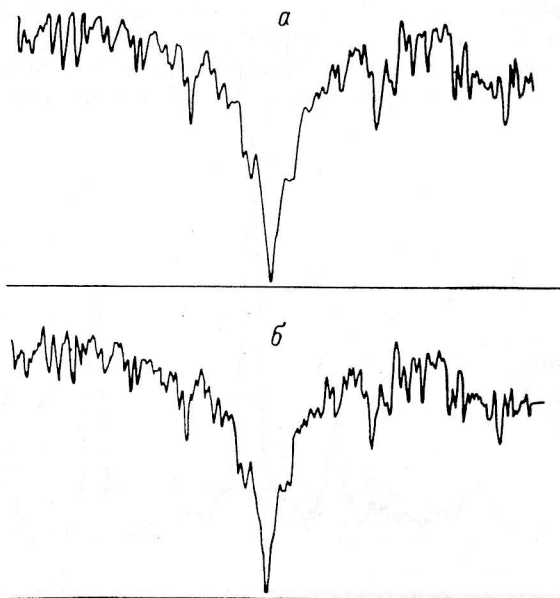


Рис. 4. Сравнение участков спектров, просканированных панорамно (а) и обычным способом (б).

результаты сканирования панорамным методом не уступают по качеству сканированию по прямой прямолинейных спектров (рис. 4).

Достоинствами предложенного метода является возможность более точного фотометрирования искривленных спектров, корректный учет фона, возможность точного отслеживания формы спектра, ускорение обработки наблюдательного материала.

Дальнейшее ускорение процесса обработки мы связываем с нахождением оптимальных методов поиска формы кривой и ускорением процесса сканирования, а также с более полной автоматизацией дальнейшей обработки: проведение континуума, вычисление эквивалентных ширин и других параметров спектра.

В заключение авторы выражают благодарность Н. Ф. Войханской за участие в обсуждении алгоритмов и помощь при проверке результатов работы программ.

#### Литература

1. Гришин М. П., Курбанов Ш. М., Маркелов В. П. Автоматический ввод и обработка фотографических изображений на ЭВМ. М.: Энергия, 1976.
2. Фотометрический комплекс САО для лабораторной обработки астрономических данных. I / О. С. Буренкова, В. П. Горошков, В. М. Гурин и др. — *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 1984, 18, с. 105—110.
3. Буренкова О. С., Коровяковская А. А., Назаренко И. И. Система сканирования и предварительной обработки спектров на фотометрическом комплексе САО АН СССР. — *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 1982, 16, с. 108—115.
4. Marchal I. La spectrographie au C. D. C. A. — *Journées d'études du C. D. C. A. Lanslebourg*, 1977, pt. D1, p. 2—7.

Поступила в редакцию 2 ноября 1982 г.