

УДК 524.387

Д. А. Ляшко

Таврический национальный университет им. В. И. Вернадского
95007 Симферополь, проспект Вернадского 4 (email: uu5jdl_1@crimea.edu)
Institute for Astronomy, University of Vienna,
Tuerkenschanzstrasse 17 A-1180 Vienna, Austria

Автоматическая нормировка на континуум эшелле-спектров звезд

Описан алгоритм автоматической нормировки на континуум эшелльных спектров звезд. Для нормировки на континуум используется спектр плоского поля, при помощи которого строится аппаратная функция прибора и находится механизм преобразования ее в функцию отклика для каждого порядка эшелле-спектра. Этот подход позволяет учесть аппаратные искажения, вносимые эшелле-спектрографом и автоматизировать процесс проведения континуума. Данный подход также позволяет решить одну из главных проблем — нормировку на континуум в порядках, которые содержат водородные линии.

АВТОМАТИЧНЕ НОРМУВАННЯ НА КОНТИНУУМ ЕШЕЛЕ-СПЕКТРІВ ЗІРОК, Ляшко Д. А. — Описано алгоритм автоматичного нормування на континуум ешелєльних спектрів зірок. Для нормування на континуум використовується спектр плоского поля, за допомогою якого одержується апаратна функція приладу та знаходиться механізм перетворення її у функцію відгуку для кожного порядку ешелєльного спектру. Цей підхід дозволяє врахувати апаратні спотворення, внесені ешелє-спектрографом і автоматизувати процес проведення континууму. Даний підхід так само дозволяє вирішити одну з головних проблем — нормування на континуум у порядках, які містять водневі лінії.

AUTOMATIC NORMALIZATION ON CONTINUUM FOR ECHELLE SPECTRA OF STARS, by Liashko D. A. — An algorithm for automatic normalization on continuum for echelle spectra of stars is proposed. For continuum normalization, we use a flat field spectrum whereby the blaze function of the device is derived and the mechanism of its transformation into response function for each order of echelle spectrum is determined. This approach allows one to take into account the hardware distortions contributed by echelle spectrograph and to automate the process of continuum normalization. Besides, the approach under discussion permits us to solve one of the main problems, namely, continuum normalization for the orders containing hydrogen lines.

Нормировка на континуум является наиболее трудоемкой операцией в обработке спектров звезд. Результат во многом определяется опытом и интуицией наблюдателя, а обработка большого количества требует значительных затрат времени. Современные программные комплексы IRAF, MIDAS, REDUCE, DECH20 позволяют автоматизировать большинство этапов обработки эшелельных спектров, однако именно этап нормировки на континуум происходит в режиме диалога, с интерактивной расстановкой точек, через которые должен проходить непрерывный спектр и аппроксимацией их кубическим сплайном или полиномом, от степени которого зависит полученный результат. Между тем обработка экспериментальных данных должна осуществляться максимально объективно. В этой связи нами предложен метод автоматической обработки эшелельных спектров звезд, исключаяющий какое-либо вмешательство со стороны наблюдателя [3]. Ниже описаны основные этапы предлагаемого подхода, иллюстрированные примерами, полученными на конкретных спектрометрах.

НОРМИРОВКА НА КОНТИНУУМ ПОРЯДКОВ ЭШЕЛЕ-СПЕКТРОВ, НЕ СОДЕРЖАЩИХ ШИРОКИХ ЛИНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ

Предлагаемый алгоритм автоматического проведения непрерывного спектра в спектрах звезд спектральных классов О—К, в спектрах которых есть участки, через которые проходит истинный непрерывный спектр, состоит из следующих этапов.

Построение аппаратной функции спектрометра. Непрерывный спектр звезды в эшелее-спектрометре искажается в результате сильной зависимости чувствительности прибора от номера пикселя вдоль оси дисперсии. Это искажение можно описать, используя т.н. аппаратную функцию спектрометра. Аппаратную функцию можно получить, анализируя спектр плоского поля (свет калибровочной лампы внутри прибора проходит тот же оптический путь, что и свет звезды). Кроме того, учет спектра плоского поля позволяет исключить из спектра звезды специфические искажения: так называемые «фринги» (интерференция света на защитном стекле ПЗС-матрицы, молекулярные полосы так называемых «мокрых» световодов и т. д.). Основой для построения аппаратной функции служит медианное среднее нескольких изображений плоского поля. Поскольку спектр плоского поля может быть искажен за счет фрингов, аппаратная функция спектрографа

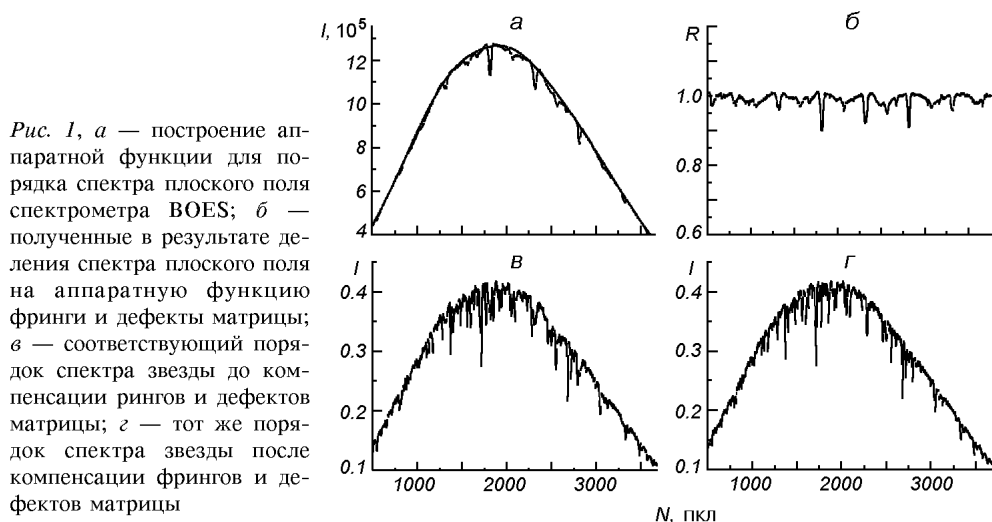


Рис. 1, а — построение аппаратной функции для порядка спектра плоского поля спектрометра BOES; б — полученные в результате деления спектра плоского поля на аппаратную функцию фринги и дефекты матрицы; в — соответствующий порядок спектра звезды до компенсации рингов и дефектов матрицы; г — тот же порядок спектра звезды после компенсации фрингов и дефектов матрицы

для каждого порядка получается путем построения гладкой огибающей (рис. 1, а).

Проведя деление спектра плоского поля на аппаратную функцию, мы получаем также возможность компенсировать фринги в спектре исследуемой звезды. Результат деления представляет собой фринги и дефекты матрицы в остаточных интенсивностях (рис. 1, б). Умножив его на соответствующий порядок спектра звезды (рис. 1, в), мы компенсируем эти искажения (рис. 1, з).

Для проведения континуума необходимо произвести преобразование аппаратной функции спектрографа, полученной по спектру калибровочной лампы, в так называемую функцию отклика, осуществляя преобразование ее формы и амплитуды.

Преобразование аппаратной функции спектрометра. Для преобразования аппаратной функции в спектре звезды для каждого порядка отбираются точки, через которые должен проходить континуум, и ищутся коэффициенты трансформации, позволяющие провести преобразованную аппаратную функцию через эти точки наилучшим образом.

Для отбора точек, через которые должен проходить континуум, применяется следующая методика. Порядок разбивается на пять интервалов, на каждом из которых для первого приближения выбираются локальные максимумы. Используя итерационную аппроксимацию сглаживающим сплайном, отбираем точки порядка спектра звезды для построения континуума (рис. 2). При использовании классической методики через данные точки проводится полином, степень которого, как правило, неизвестна. Изменение формы аппаратной функции порядка позволяет провести континуум наилучшим образом. Количество точек отбирается с запасом, так как не все отобранные точки являются точками истинного континуума.

Исследования показывают, что преобразование аппаратной функции спектрометра в функцию отклика в каждом порядке может быть осуществлено введением параметра сдвига S , масштабного коэффициента B и нелинейного параметра A , который учитывает изменение формы аппаратной функции спектрометра на краях порядков эшеле-спектров звезд.

Коэффициенты трансформации определяются из следующего соображения. Если в данном порядке эшеле-спектра имеются точки, достаточно близкие к континууму, то линия, проведенная через эти точки, после деления спектра звезды на непрерывный спектр должна быть прямой, параллельной оси длин волн и иметь значение 1.

Для определения параметра S мы делим ординаты отобранных точек на ординаты аппаратной функции спектрометра и подбираем методом минимизации величину сдвига $X = X - S$ таким образом, чтобы получить аппроксимирующую прямую, параллельную оси длин волн.

Масштабный коэффициент B определяется как медианное среднее результата деления точек условного континуума на аппаратную функцию спектрометра, преобразованную с помощью коэффициента S . Медианное среднее используется для исключения дефектов спектра.

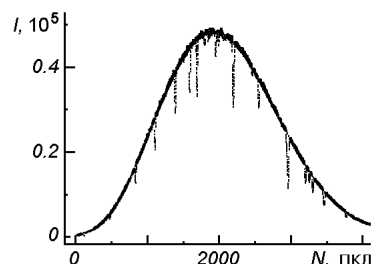


Рис. 2. Отобранные точки для проведения континуума в спектре звезды

На краях порядка необходимая дополнительная коррекция осуществляется с помощью нелинейного коэффициента A :

$$Bl_{\text{new}} = \frac{(Bl + A)}{(1 + A)}, \quad (1)$$

где Bl_{new} — нормированная функция отклика, Bl — нормированная аппаратная функция. Нелинейная поправка возникает из-за различного количества света, накопленного в центре и на краях порядка. Коэффициент A может быть непостоянным и определяется для отобранных точек по формуле

$$A(x) = \frac{Bl(x) - y(x)}{y(x) - 1}, \quad (2)$$

где $Bl(x)$ — значение аппаратной функции для отобранных точек, $y(x)$ — отобранные точки из спектра звезды. После вычисления параметра A по отобранным точкам проводится его усреднение.

На рис. 3 показаны аппаратная функция и полученная функция отклика для 34-го порядка спектра Сириуса для пятого фибера спектрографа ВОЕС.

НОРМАЛИЗАЦИЯ НА КONTИНУУМ ПОРЯДКОВ ЭШЕЛЕ-СПЕКТРОВ, СОДЕРЖАЩИЕ ШИРОКИЕ ЛИНИИ ПОГЛОЩЕНИЯ

Даже в эпоху фотографических эмульсий и обычных не эшелюных низкодисперсионных спектров, нормализация на континуум широких, в первую очередь водородных линий в спектрах звезд спектральных классов А-Г являлась проблемной. Тем более данная задача является проблемной для эшелюных спектров. Из рис. 4 видно, что восстановить функцию отклика в соответствующих порядках практически невозможно. Простое деление спектра звезды на аппаратную функцию способно несколько улучшить ситуацию, но результат очень далек от тех точностей, которые требуют современные проблемы физики звездных атмосфер.

В этой связи мы используем технологию восстановления функции отклика в порядках, содержащих водородные линии, используя значение функции отклика, полученные для остальных порядков эшелю-спектра. Процедура позволяет определить функцию отклика для водородного порядка путем интерполяции коэффициентов S и B . Тогда по известной аппаратной функции и значениям коэффициентов мы получаем функцию отклика для порядка, содержащего водородную линию.

Для проведения интерполяции коэффициента S определяется длина волны, на которую приходится максимум аппаратной функции λ_c . Зависимость волнового числа ($1/\lambda_c$) от номера порядка оказывается линейной и

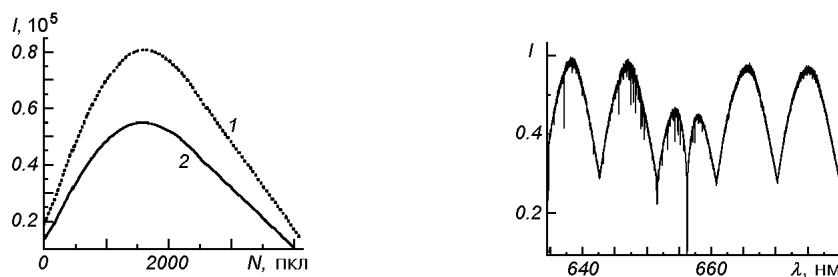


Рис. 3. Аппаратная функция и полученная в результате преобразований функция отклика для 34 порядка спектра Сириуса спектрографа ВОЕС

Рис. 4. 49-й, 50-й и 51-й порядки спектра Сириуса, содержащие линию H_{α}

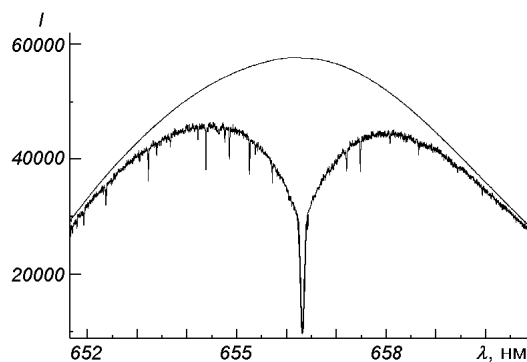


Рис. 5. Результат интерполяции функции отклика для 50-го порядка спектра Сириуса, содержащего линию H_{α}

позволяет определить длину волны максимума водочных порядков, а следовательно, и коэффициент S .

Значения коэффициентов B находятся как результат аппроксимации кубическим сплайном их зависимости от порядка эшелле-спектрографа.

Значение третьего параметра A определяется из условия совпадения нормализованных спектров в местах пересечения с соседними порядками и путем интерполяции функции отклика соседних порядков. На рис. 5 показан результат восстановления порядка, содержащего линию H_{α} в спектре Сириуса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный алгоритм позволяет автоматизировать процесс проведения непрерывного спектра для эшелльных спектров и проводить его в реальном времени сразу же после проведения наблюдений. Сравнения проведенного континуума для спектров Сириуса и Проциона, полученных на спектрографе BOES, с атласами Куруца и Гриффина, дают точность лучше чем 0.5 %.

В настоящее время описанная методика внедрена и используется в НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» (Украина), ВАОО (Южная Корея), в Институте астрономии Венского университета. На базе предложенной методики была обработана наземная часть наблюдений по проекту COROT [2]. В данное время методика адаптирована для спектрографов UVES и FEROS обсерватории ESO [1].

Автор признателен В. Цымбалу, стимулировавшему данную работу, а также Д. Мкртчяну и Г. Галазутдинову за тестирование программы и предоставленные спектры, В. Вайсу за обсуждения и поддержку.

Автор признателен за поддержку следующим фондам: The Austrian Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (P-14984), the BM: BWK and ASA (project COROT).

1. Sachkov M., Ryabchikova T., Bagnulo S., et al. Spectroscopic study of the pulsations in the roAp star HD 24712 // Communications in Astroseismology.—2006.—147.—P. 97—100.
2. Solano E., Catala C., Garrido R., et al. GAUDI: a preparatory archive for the COROT mission // Astron. J.—2005.—129, N 1.—P. 547—553.
3. Tsymbal V., Lyashko D., Weiss W. W. Processing stellar Echelle spectra // Proc. IAU Symp N 210 / Eds N. Piskunov, W. W. Weiss, D. F. Gray. — Uppsala: Astron. Soc. Pacif.—2003.—P. E49.

Поступила в редакцию 25.06.05