

СПЕКТРОФОТОМЕТР НИЗКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ БЫСТРОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ И ФОТОМЕТРИИ ЗВЕЗД

Б. Е. Жилияев¹, К. О. Стеценко¹, А. В. Сергеев²,
М. В. Андреев², Ю. С. Иванов¹, О. А. Святогор¹

© 2009

¹ Главная астрономическая обсерватория НАН Украины
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного, 27
e-mail: zhilyaev@mao.kiev.ua

² Международный центр астрономических и медико-экологических исследований
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного, 27

Создан и испытан на телескопе Цейс-600 обсерватории на пике Терскол бесщелевой (*imaging*) спектрограф, который позволяет регистрировать непрерывный спектр в области 3500–9000 Å и спектральные линии с эквивалентной шириной ≥ 5 Å. Можно получать *UBVR*-характеристики объекта, выполняя математическую свертку спектра с кривой пропускания фильтра. Для оценки основных характеристик прибора проведены спектральные наблюдения звезды типа Вольфа–Райе WR133, вспыхивающей звезды YZ CMi, ряда спектрофотометрических стандартов. Результаты экспериментальных наблюдений и испытаний показали следующее: 1) Прибор позволяет получать спектры с разрешением 30–60 Å ($R \sim 100$) объектов до 15^m с временем накопления $\simeq 1000$ с при отношении сигнал/шум = 20, а в режиме *UBVR*-фотометрии вплоть до 19^m при отношении сигнал/шум = 5. Эти оценки справедливы для телескопа Цейс-600 с камерой SpectraVideo™ Camera, Pixel Vision, Inc. 2) Преимущество бесщелевого спектрофотометрического прибора в отличие от стандартного ПЗС-фотометра состоит в одновременной регистрации излучения во всем спектральном диапазоне (3500–9000 Å). 3) Такой прибор проигрывает стандартному ПЗС-фотометру около одной звездной величины по проникающей силе за счет потери излучения в нулевом порядке спектра. 4) Прибор имеет несомненные преимущества по сравнению со стандартным фотометром при быстрой спектроскопии наблюдаемого объекта. Кратко обсуждается применение бесщелевого спектрофотометра для исследования вспыхивающих звезд.

ВВЕДЕНИЕ

В бесщелевом (*imaging*) спектрографе низкого разрешения в качестве диспергирующего элемента используется прозрачная дифракционная решетка. Роль входной щели спектрального прибора играет изображение звезды. Размер изображения определяет разрешающую силу прибора. На нее также оказывают влияние хроматическая кома и кривизна поля. Разрешающая сила такого прибора обычно составляет величину $R \sim 100$.

Бесщелевые спектрографы установлены на борту космических аппаратов HST и SWIFT. На Космическом телескопе Хаббла (HST) установлены бесщелевые спектрографы STIS и NICMOS. Спектрограф NICMOS покрывает область длин волн 1.10–1.95 микрон с дисперсией 80 Å/пкл и разрешением около 125 Å [1]. Спектрограф включает призму, комбинацию решетки и призмы, вмонтированную в турель фильтров. Для объектов ярче чем $H \approx 17$ типичные измеренные значения отношения сигнал/шум составляют 50 и более. В июле 2007 г. архив Космического телескопа Хаббла содержал около 9000 наблюдений со спектрографом NICMOS.

Призм-спектрограф установлен также на ультрафиолетовом оптическом телескопе космического аппарата SWIFT. Спектрограф работает в области спектра 1700–2900 Å и обеспечивает спектральное разрешение $R \sim 150$ для звезд с величинами в области 11–15^m с умеренным отношением сигнал/шум [2]. Его основная задача состоит в регистрации спектра оптического излучения послесвечения космической гамма вспышки и определения расстояния до источника по величине космологического красного смещения.

Бесщелевой спектрограф, описанный в настоящей работе, позволяет регистрировать непрерывный спектр в области 3500–9000 Å и спектральные линии с эквивалентной шириной ≥ 5 Å. Для слабых объектов из записи такого спектра можно получать оценки звездных величин $UBVR$, выполняя математическую свертку спектра с кривой пропускания фильтра.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

В нашей работе мы следуем методу проектирования классического спектрографа, изложенного в работе Thizu и др. [3]. Мы будем рассматривать бесщелевой спектрограф, состоящий из двух компонент: дифракционной решетки и ПЗС-камеры. Разрешающая сила такого спектрографа обычно составляет величину порядка 50–100 (50–100 Å в области 5000 Å) и не зависит от конструкции дифракционной решетки. В решетках хорошего качества штрихи имеют специальную форму, большая часть света концентрируется в заданном порядке дифракции, отличном от нулевого (такой угол дифракции называется углом блеска решетки). В нашем приборе решетка имеет 100 штрихов на миллиметр, диаметр – 25 мм. Ее эффективность в 0 и +1 порядках дифракции составляет 22.5% и 67.6% соответственно. Порядки выше чем 2 мы игнорируем из-за их малого вклада в энергетический баланс.

В плоскости ПЗС-приемника дисперсия P в ангстремах на миллиметр может быть вычислена как

$$P = \frac{10^7 \cos(\beta)}{k \cdot m \cdot d}, \quad (1)$$

где d – расстояние между решеткой и фокальной плоскостью в миллиметрах, β – угол исходящего луча после дифракции, m – число штрихов решетки на миллиметр, k – порядок спектра. Главным источником aberrаций в бесщелевом спектрографе является хроматическая кома. Размер комы в зависимости от длины волны имеет вид:

$$d\lambda_c = \frac{3\lambda}{16N^2}, \quad (2)$$

где λ – длина волны, $N = F/D$ – отношение фокусного расстояния F к диаметру телескопа D . Отметим, что спектральное разрешение, ограниченное комой, не зависит от характеристик решетки, но существенно зависит от относительного отверстия телескопа N . Типичная характеристика комы такова, что примерно 80% энергии концентрируется в пятне, определяемом выражением (2).

ВЫЧИСЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ В СПЕКТРЕ

Мы будем вычислять величину отношения сигнал/шум, SNR , в окрестности линии H_α (6563 Å). Отношение сигнал/шум в спектре задается выражением:

$$SNR = \frac{C \cdot T}{\sqrt{C \cdot T + N_s \cdot (B + D) \cdot T + N_r \cdot \sigma^2}}, \quad (3)$$

где T – время экспозиции в секундах, C – сигнал от звезды в электронах в секунду в континууме звезды величины m . Величина C определяется формулой

$$C = C_0 \cdot 10^{-0.4m}. \quad (4)$$

Величина C_0 имеет вид:

$$C_0 = E_0(\lambda) \cdot S \cdot \Delta\lambda \cdot R(\lambda), \quad (5)$$

$E_0(\lambda)$ – световой поток от звезды нулевой величины $V = 0$ спектрального класса A0 V.

Вычисления дают: $E_0(6563 \text{ Å}) = 733 \text{ фотон} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Å}^{-1}$.

S – площадь апертуры телескопа.

$\Delta\lambda$ – ширина элемента спектра, определяемая хроматической комой и атмосферными условиями.

$R(\lambda)$ – пропускание прибора, которое включает пропускание атмосферы, оптики инструмента, эффективность решетки, квантовый выход ПЗС. Мы полагаем $R(6563 \text{ Å}) = 0.14$.

B – фон неба, выраженный в электронах в секунду на пиксел.

D – темновой сигнал в электронах в секунду на пиксел.

N_s – число пикселей в изображении спектра вдоль оси, перпендикулярной направлению дисперсии.

N_r – суммарное число кадров за время экспозиции T .

σ^2 – дисперсия шума чтения, выраженная в электронах.

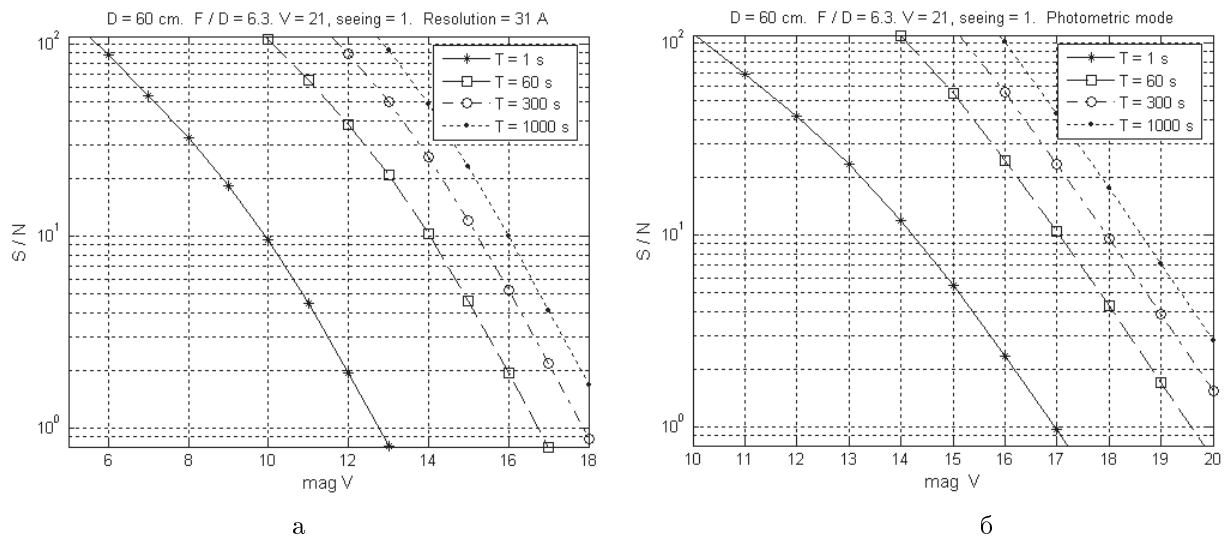


Рис. 1. *a* – Отношение сигнал/шум для 60-см телескопа с дифракционной решеткой 100 линий/мм в спектре первого порядка. Спектральное разрешение составляет 31 \AA . При отношении сигнал/шум, равном 10, звезда 14^m дает четкий спектр в течение времени накопления, равном 60 с, а 16^m – в течение 1000 с. *б* – Отношение сигнал/шум в режиме “фотометрии”. При точности фотометрии $\sim 0.2^m$ можно регистрировать звезды до 19^m за время экспозиции 1000 с

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для иллюстрации предыдущих вычислений на рис. 1 приведены зависимости отношения сигнал/шум – звездная величина от времени экспозиции в окрестности линии H_α для звезды класса A0 V. Вычисления выполнены для телескопа Цейс-600 диаметром 60 см с $F/D = 6.3$. Фон неба соответствует 21 звездной величине с квадратной угловой секунды, качество изображения – одна угловая секунда. Фотоприемник – SpectraVideo™ Camera, Pixel Vision, Inc. Сенсор: SI003AB, 1024×1024 , размер пиксела = 24×24 микрон. Шум считывания: 5–8 электронов, темновой ток < 1 электрон/пкл/с при -45° C .

Испытания опытного образца бесщелевого спектрографа низкого разрешения проводились на телескопе Цейс-600 на пике Терскол в январе–марте 2009 г. Были проведены спектральные наблюдения звезды типа Вольфа–Райе WR133, вспыхивающей звезды YZ CMi, ряда спектрофотометрических стандартов.

Наблюдения вспыхивающей звезды YZ CMi в спокойном состоянии ($U \approx 12.9$, $B \approx 12.7$, $V \approx 11.1$, $R \approx 10.3$) показали, что можно получать качественные спектры с временным разрешением около 10 с. Во время вспышки время экспозиции может быть уменьшено до нескольких секунд.

На рис. 2, *a* показаны дифференциальные спектры вспыхивающей звезды YZ CMi относительно звезды сравнения. Видна эмиссия в бальмеровских линиях (эквивалентная ширина $6\text{--}7 \text{ \AA}$, $FWHM \sim 125\text{--}150 \text{ \AA}$). Точность спектра $0.1\text{--}0.2^m$ при времени экспозиции 30 с ($U = 12.9$). Бальмеровский скачок не превышает величины 0.1^m .

Бесщелевой спектрограф, описанный в настоящей работе, является макетом, подлежащим доработке и усовершенствованию. Низкое спектральное разрешение на текущий момент ($\sim 125\text{--}150 \text{ \AA}$) является следствием неоптимальной конструкции макета. В окончательном варианте прибора эти недостатки будут устранены.

На рис. 2, *б* показаны *UBVR*-кривые блеска YZ CMi относительно звезды сравнения, полученные из спектральных данных путем свертки спектров с кривыми реакции фильтров. Кривые показывают слабые синхронные вариации, связанные с изменениями атмосферной прозрачности. Ошибки по 50 данным в *UBVR* составляют: ± 0.009 , ± 0.007 , ± 0.007 , $\pm 0.008^m$. Таким образом, дифференциальная спектрофотометрия позволяет достигнуть фотометрическую точность меньше одного процента.

Спектральные данные наблюдений записываются в FITS-формате. Для обработки спектров разработано оригинальное программное обеспечение на языке MATLAB. Полная обработка 50 спектров, представленных на рис. 2, занимает около одной минуты машинного времени.

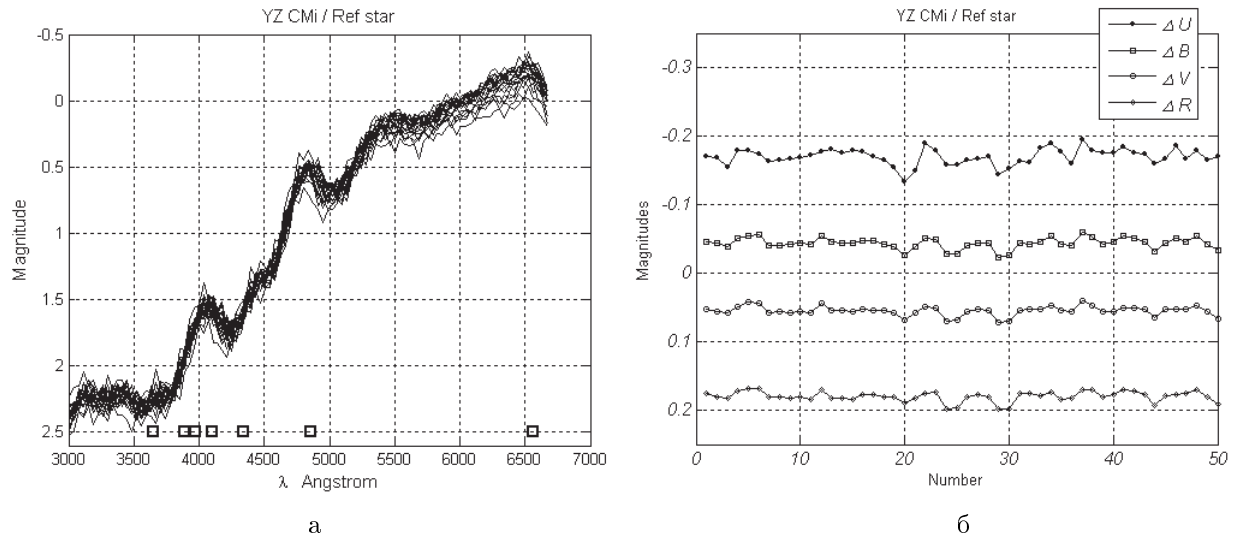


Рис. 2. Ряд дифференциальных спектров вспыхивающей звезды YZ CMi с эмиссией в бальмеровских линиях в спокойном состоянии, время экспозиции 30 с (а). *UBVR*-кривые блеска YZ CMi относительно звезды сравнения, полученные из спектральных данных путем свертки спектров с кривыми реакции фильтров (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан и испытан на телескопе Цейс-600 обсерватории на пике Терскол бесщелевой (*imaging*) спектрограф, который позволяет регистрировать непрерывный спектр в области 3500–9000 Å. Прибор позволяет решать ряд задач в области быстрой спектроскопии и фотометрии:

- Выполнять быструю спектрометрию звезд до 13–14^м за время накопления 10–30 с со спектральным разрешением $R \sim 100$.
- Получать спектры объектов до 16–17^м с разрешением 30–60 Å за время накопления 1000 с с телескопами умеренных размеров.
- Регистрировать спектральные линии с эквивалентной шириной ≥ 5 Å.
- Проводить одновременную *UBVR*-фотометрию объектов до 18–19^м.

Такой прибор проигрывает стандартному ПЗС-фотометру около одной звездной величины по проникающей силе за счет потери излучения в нулевом порядке спектра. В то же время прибор имеет несомненные преимущества по сравнению со стандартным фотометром при быстрой спектроскопии наблюдаемого объекта.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины, Проект № Ф28.2/034.

- [1] *Freudling W., Kummel M., Haase J., et al.* The Hubble Legacy Archive NICMOS grism data // *Astron. and Astrophys.* – 2008. – **490**. – P. 1165–1179.
- [2] *Roming P. W. A., Kennedyb T. E., Masonb K. O., et al.* The Swift Ultra-Violet/Optical Telescope // *arXiv:astro-ph/0507413*.
- [3] *Thizy O., Buil C., Francois C., Neiner C.* Organizing a professional-amateur collaboration with a Lhires III spectrograph // *Planet. and Space Sci.* – **56**, Issue 14, November 2008. – P. 1878–1881.