СПЕКТРОФОТОМЕТР НИЗКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ БЫСТРОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ И ФОТОМЕТРИИ ЗВЕЗД

Б. Е. Жиляев[1], К. О. Стеценко[1], А. В. Сергеев[2], М. В. Андреев[2], Ю. С. Иванов[1], О. А. Святогоров[1]

[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 ($R\sim100$) объектов до 15^m с временем накопления $\simeq1000$ 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 SpectraVideoTM 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 проницающей 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 гризму, 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.

Гризм-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 Thizy 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

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

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 аберраций в бесщелевом спектрографе является хроматическая кома. Размер комы в зависимости от длины волны имеет вид:

$$d\lambda_c = \frac{3\,\lambda}{16\,N^2}, \tag{2}$$

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:

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

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

$$C = C_0 \cdot 10^{-0.4\,m}. \tag{4}$$

Величина C_0 имеет вид:

$$C_0 = E_0(\lambda) \cdot S \cdot \Delta\lambda \cdot R(\lambda), \tag{5}$$

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

Вычисления дают: $E_0(6563\,\text{Å}) = 733$ фотон $\cdot$ см$^{-2}$ с$^{-1}$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 $R(6563\,\text{Å}) = 0.14$.

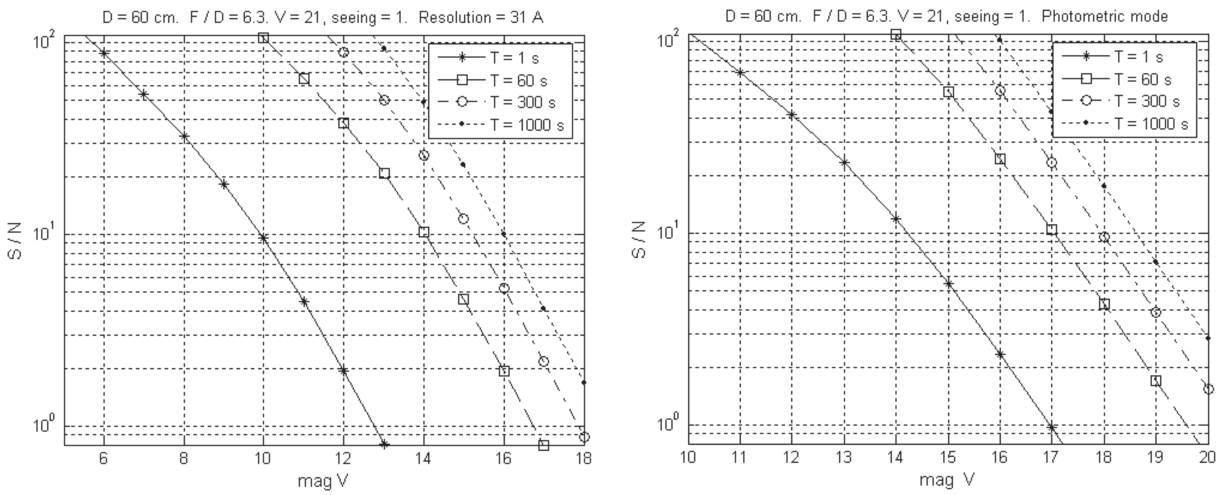
B – фон неба, выраженный в электронах в секунду на пиксел.

D – темновой сигнал в электронах в секунду на пиксел.

N_s – число пикселов 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.



а   б

Рис. 1. *а* – Отношение сигнал/шум для 60-см телескопа с дифракционной решеткой 100 линий/мм в спектре первого порядка. Спектральное разрешение составляет 31 Å. 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 – SpectraVideoTM 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° С.

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.

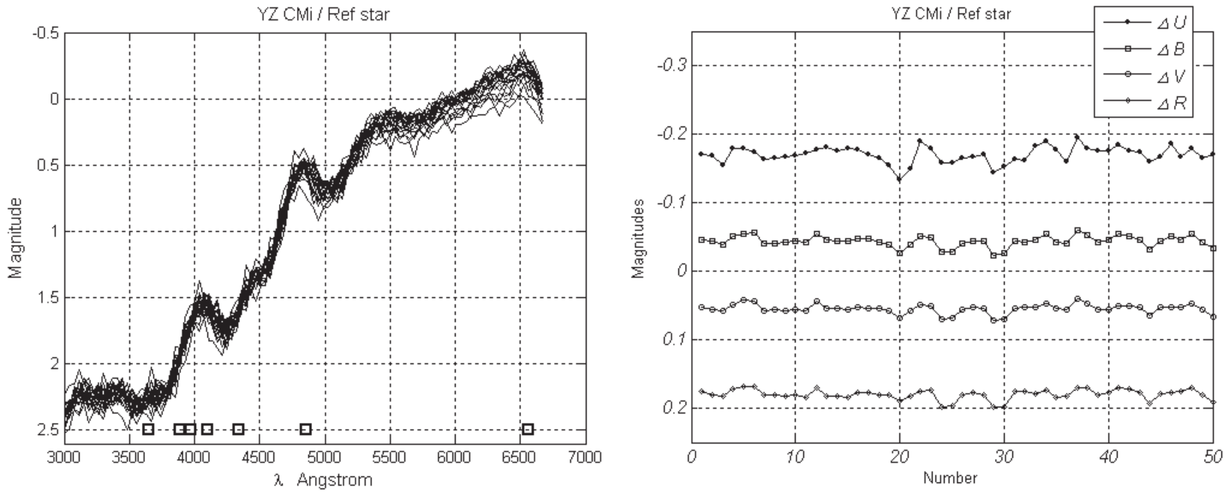
Наблюдения вспыхивающей звезды YZ CMi в спокойном состоянии ($U \approx 12.9$, $B \approx 12.7$, $V \approx 11.1$, $R \approx 10.3$) показали, что можно получать качественные спектры с временным разрешением около 10 с. Во время вспышки время экспозиции может быть уменьшено до нескольких секунд.

На рис. 2, *а* показаны дифференциальные спектры вспыхивающей звезды YZ CMi относительно звезды сравнения. Видна эмиссия в бальмеровских линиях (эквивалентная ширина 6–7 Å, $FWHM \sim 125$–150 Å). Точность спектра 0.1–0.2^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 (~ 125–150 Å) 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.



а б

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

Такой прибор проигрывает стандартному ПЗС-фотометру около одной звездной величины по проницающей 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.