

УДК 524.387

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЭМУЛЯЦИИ СПЕКТРОВ
УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО КОСМИЧЕСКОГО ЭШЕЛЛЕ СПЕКТРОГРАФА
«TUES»**

Ляшко Д.А., Алентьев Д.В.

*Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Украина
E-mail: dlyashko@gmail.com, sl4m@ukr.net*

Описан алгоритм моделирования трансформации света от искусственного объекта, представленного рассчитанным теоретическим спектром через оптический тракт эшелле спектрографа и регистрацию его на фотоприемнике. Полученное изображение представлено в виде стандартного FITS файла, которое может быть использовано для выбора экспозиции и параметров наблюдений реального прибора, при заданном значении отношения сигнал/шум.

Ключевые слова: Эшелле спектр, экстракция, эмуляция.

ВВЕДЕНИЕ

Стремление вынести наблюдательные инструменты за пределы атмосферы связано с тем, что её прозрачность ограничена лишь двумя сравнительно узкими спектральными областями: видимым светом (длина волны 3000-7500Å) и радиодиапазоном (от 1,25 см до 30 м). Приходящие от астрономических объектов излучение в других длинах волн в той или иной степени поглощаются в основном водяным паром, углекислым газом, озоном. Поглощение быстро убывает с высотой над поверхностью Земли. Значительные помехи в наземных наблюдениях обусловлены также запылённостью атмосферы, облаками и преломлением света на термических неоднородностях атмосферы, вызывающих мерцание. Внеатмосферные исследования дополняют результаты наземных астрономических наблюдений и позволяют получить новые астрофизические результаты.

При подготовке миссий космических телескопов необходимо заранее предусмотреть все особенности, возникнуть в процессе полета и заранее спланировать программу наблюдений. Процесс подготовки осложняется еще и тем, что разработкой и изготовлением аппаратуры занимаются другие фирмы и получить реальные характеристики приборов возможно только после проведения его наземных испытаний.

В настоящее время основными спектральными приборами, устанавливаемыми на современных космических телескопах, являются эшелльные спектрографы (спектрографы со скрещенной дисперсией). Основными преимуществами таких приборов являются большая разрешающая способность, регистрация большого спектрального диапазона, возможность применения в качестве регистрирующих элементов приборов с зарядовой связью (CCD матриц). На небольшой площади

такие приборы позволяют поместить спектр объекта в виде разнесенных в пространстве старших порядков дифракционной решетки.

Разработанный программный комплекс позволяет моделировать процесс регистрации эшелле спектра в спектрографе и по наблюдаемым характеристикам объекта оценить время экспозиции при заданном отношении сигнал/шум. Для моделирования и проверки результатов был выбран эшелле спектрограф TUES, который был установлен на космическом аппарате ORFEUS II, совершивший полет в ноябре-декабре 1996 года. Данный прибор был выбран потому, что его конструкция была положена в основу разрабатываемому спектрографу для международного проекта "Спектр-УФ", запуск которого планируется в 2014 года. Структура программного комплекса разработана таким образом, что позволяет задавать основные параметры любого спектрографа и получать на выходе изображение эшелле спектра. Т.е. отработав методику моделирования на хорошо известном приборе можно применить данный инструмент для спектрографа, разрабатываемого в рамках проекта "Спектр-УФ".

1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СПЕКТРОГРАФА

Для построения эшелле спектра искусственного объекта используется следующая информация:

1. Так как любой эшелле спектрограф является составной частью всего космического телескопа, то необходимо учитывать такие оптические характеристики, как диаметр главного зеркала, количество отражающих поверхностей на пути от зеркала до фотоприемника, спектральную эффективность всей оптической системы в целом. Основные характеристики телескопа ORFEUS II и спектрографа TUES приведены в работе [1]. Приведенная в работе спектральная эффективность представлена на рис. 1.

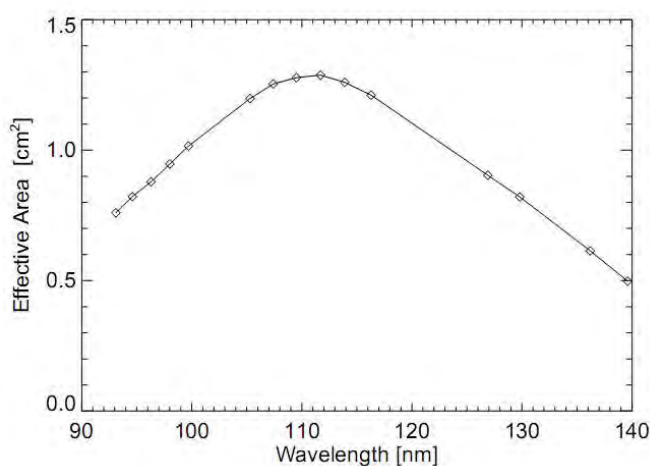


Рис. 1. Спектральная эффективность спектрографа TUES измеренная по спектру белого карлика G191B2B.

Данная спектральная зависимость была аппроксимирована полиномом 5 степени и включена в базу данных спектрографа.

2. Второй важной характеристикой спектрографа является рабочий диапазон длин волн. Данный спектрограф работает в дальней ультрафиолетовой части спектра. Спектр, получаемый на приборе, занимает 21 спектральный порядок в диапазоне длин волн от 900 до 1400 ангстрем.

3. Спектральное разрешение прибора и размерность матрицы фотоприемника.

4. Следующей характеристикой, которая позволит создать искусственный спектр является положение порядков. В реальном спектрографе положения порядков на матрице фиксированы, но в зависимости от температуры и положения прибора относительно Земли их координаты незначительно меняются. Для задания положений порядков была использована пиксельная координатная сетка. В рамках выбранной системы координат, по изображению полученных на данном спектрографе изображений были определены и аппроксимированы полиномом 3 степени положения порядков и коэффициенты аппроксимации занесены в базу данных по спектрографу.

5. Дифракционная решетка и кроссдисперсионная призма искривляют спектр и делают дисперсионную кривую прибора нелинейной. Для корректного учета этой нелинейности в базу данных занесены коэффициенты аппроксимации дисперсионной кривой для каждого порядка эшелле спектра.

6. Дифракционная решетка внесет искажение в относительное распределение интенсивности в исследуемом спектре. Данная зависимость коэффициента отражения дифракционной решетки может быть представлена в виде:

$$\rho(\lambda) = \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2$$

Для учета данных искажений эта теоретическая функция u может быть представлена в виде:

$$u = \pi m \alpha \left(1 - \frac{\lambda(m)}{\lambda} \right)$$

где, m – номер спектрального порядка α – параметр, влияющий на полуширину функции, $\lambda(m)$ – длина волны на которую приходится максимум излучения порядка с номером m , λ – длина волны. На рис.2. показана функция блеска для 7 порядка спектрографа TUES

Коэффициенты аппроксимации функции блеска для каждого порядка, являются параметрами базы данных спектрографа.

7. Для расчета освещенности пикселей на светоприемнике в базу данных спектрографа были добавлены физические размеры и площадь каждого элемента матрицы.

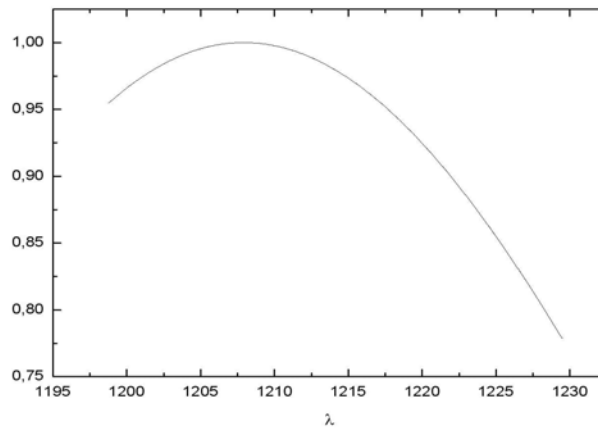


Рис. 2. Функция блеска для 7 порядка спектрографа TUES.

2. ПАРАМЕТРЫ НАБЛЮДАЕМОГО СПЕКТРА

Выходящий поток излучения на поверхности звезды, вычисляемый программой расчета синтетических спектров [2] есть поток в смысле Эддингтона (момент потока):

$$H_{\nu}(\text{erg} / \text{sec} / \text{cm}^2 / \text{Hz}) = \frac{4\pi c}{\lambda^2} F_{\lambda},$$

где, F_{λ} – поток, выходящий из атмосферы звезды.

Поток на орбите Земли определяется как:

$$f_{\lambda} = \left(\frac{R_{*}}{d} \right)^2 F_{\lambda},$$

где, R_{*} - радиус звезды, d – расстояние до объекта наблюдения.

Или, используя угловой диаметр a :

$$f_{\lambda} = \frac{1}{4} a^2 F_{\lambda},$$

Обычно угловой диаметр выражается в угловых миллиарксекундах.

$$I'' = 2 \cdot 206264806 \text{ mas}$$

Для того, чтобы “переместить” полученный спектр на орбиту Земли, нам нужно знать угловой диаметр звезды. Для этого свернем полученное распределение энергии в спектре с кривой реакции фильтра V фотометрической системы Джонсона, переведем его в звездные величины, используя нуль-пункт из работы [3]. Задавая наблюдаемое значение цвета в фильтре V , которое является наблюдаемой звездной величиной, мы получаем видимый угловой диаметр, который является коэффициентом перехода к потокам на орбите Земли.

Для того, чтобы рассчитать цвет V на поверхности звезды, приходится рассчитывать синтетический спектр в интервале до 7500Å и проводить свертку с кривой реакции фильтра. Проведение свертки в программе вызвано тем, что в качестве темплейтов могут быть использованы наблюдаемые распределения энергии объектов таких как квазары, галактики, активные ядра галактик и т.д. По этой же причине в программу включена свертка с аппаратной функцией спектрографа.[4].

Согласно теории работы эшелле спектрографа [5], распределение интенсивности в фокальной плоскости прибора описывается следующим выражением:

$$f(\lambda) = f_0(\lambda) \cdot r(\lambda),$$

здесь $f(\lambda)$ -интенсивность излучения в фокальной плоскости спектрографа, $f_0(\lambda)$ -интенсивность излучения на щели спектрографа, $r(\lambda)$ - функция блеска спектрографа.

Следовательно, нашей задачей является изменить амплитуды пикселей с учетом интенсивности синтетического спектра. Для того, чтобы корректно провести трансформацию, необходимо откорректировать падающую интенсивность с физическими размерами пикселей и шагом длин волн. Полученный поток излучения соответствует экспозиции в 1 секунду. Так как разрядная сетка считывателя фотоприемника спектрографа TUES позволяет регистрировать отсчеты до максимального значения 32768, то можно определить максимальное значение экспозиции, которое не приведет к искажению формы сигнала. Кроме максимального значения экспозиции, можно определить время, необходимое для получения заданного значения отношения сигнал/шум. Предположив, что отношение сигнал/шум пропорционально $\sqrt{N}$, где N значение отсчета пикселя, можно рассчитать поток в каждом пикселе, который соответствует заданным параметрам, и время экспозиции для данного объекта. Важную роль при проведении наблюдений играет и максимальная амплитуда шумов, искажающая результирующий спектр. Считая шум регистрации и считывания чисто пуассоновским, можно рассчитав случайную величину нормировать ее на значение $\sqrt{N}$ и исказить результирующий спектр. На рис.3. Показан 10 порядок спектрографа TUES до и после наложения шумов.

Трансформация синтетического спектра поперек оси дисперсии осуществляется в предположении гауссова падающего пучка. Профиль порядка поперек оси дисперсии задается гауссианой, амплитуда которой трансформируется согласно интенсивности падающего излучения в каждой точке спектра. Механизм трансформации подробно описан в работе [6].

Результатом работы программы является двумерное изображение, «считанное» с ПЗС матрицы и записанное в общепринятом в астрофизике FITS формате.[7]

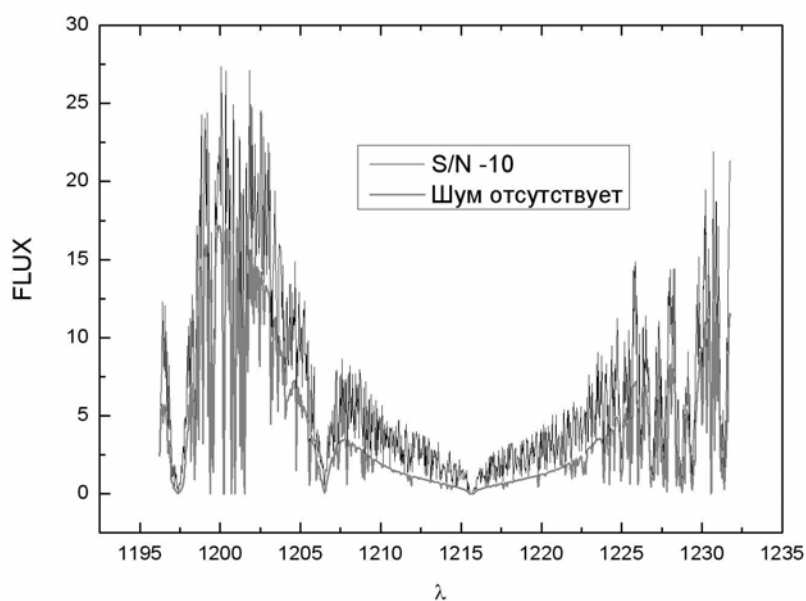


Рис. 3. 7 порядок спектрографа TUES до и после наложения шумов.

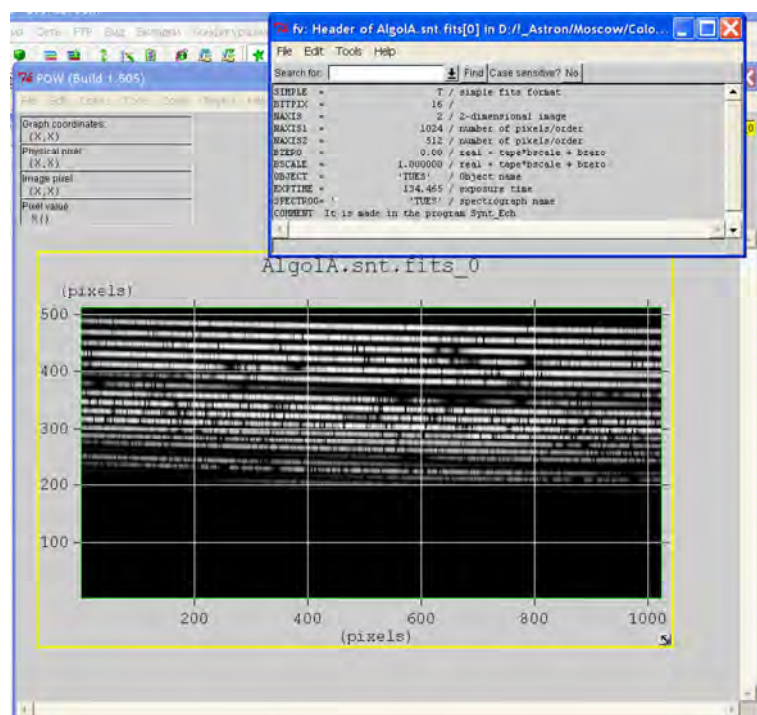


Рис. 4. Просмотр полученного изображения в программе просмотра FITS файлов FV.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный программный комплекс позволяет моделировать процесс получения эшелле спектра искусственного объекта .

Полученная методика позволяет:

- Смоделировать процессы регистрации спектров в спектрографах со скрещенной дисперсией на CCD матрицу.
- Изменять параметры спектрографа для получения нужных параметров наблюдений.
- Оптимизировать проведение наблюдений для получения спектрального материала нужного качества
- Протестировать комплексы программ обработки, исследуя спектр объекта, для которого заранее известен абсолютно правильный результат обработки.
- Оценить реальную разрешающую способность спектрографа.
- Подготовить программу наблюдений, отобрав объекты, которые реально можно наблюдать с нужным отношением сигнал/шум.
- Оптимизировать параметры спектрографа до окончания его разработки.

Список литературы

1. Barnstedt J. The ORFEUSII Echelle spectrometer Instrument description, performance and data reduction / Barnstedt J., Kappelman N., Appenzeller I. // Astronomy & Astrophysics. – 1999. – vol.134. – p.561-567.
2. Tsymbal V. in Processing Stellar Echelle Spectra, IAU Symp 210 / Tsymbal V., Lyashko D., & Weiss W. W. // editors Piskunov N., Weiss W., Gray F., Astr. Soc. Pacific, 2003.
3. Colina L. Absolute nflux calibrated spectrum of Vega / Colina L., Bohli R., Castelli F. // Instrument Science Report CAL/SCS-008, 1996.
4. Tsymbal V.V. in Model Atmospheres and Spectral Synthesis / Tsymbal V.V. // ed. Adelman S.J., Kupka F. & Weiss W.W., ASP, 1996.
5. Зайдель А.Н. Техника и практика спектроскопии / Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. – М.: Наука. – 1972. – 375 с.
6. Ляшко Д.А. Методика создания эшелле спектра искусственной звезды / Ляшко Д.А. // Ученые записки Таврического национального университета имени В.И.Вернадского. – 2005. – Том 17-18 (54-55). – С. 94-101.
7. Francisco Valdes The IRAF_NOAO Spectral World Coordinate Systems

Ляшко Д.А. Програмний комплекс для емуляції спектрів ультрафіолетового космічного ешелле спектрографа «TUES»/ Ляшко Д.А., Алєнтьєв Д.В. // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Фізико-математичні науки. – 2010. – Т. 23(62), №3. – С. 202-209.

Описаний алгоритм моделювання трансформації світла від штучного об'єкту, представленого розрахованим теоретичним спектром через оптичний тракт ешелле спектрографа і реєстрацію його на фотоприймачі. Отримане зображення представлено у вигляді стандартного файлу FITS, яке може бути використане для вибору експозиції і параметрів спостережень реального приладу, при заданому значенні відношення сигнал/шум.

Ключові слова: Ешелле спектр, екстракція, емуляція.

Lyashko D.A. Programmatic complex for emulation of spectrums of ultraviolet space eshelle spectorgraph «TUES»/ Lyashko D.A., Alentiev D.V. // Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. – Series: Physics and Mathematics Sciences. – 2010 – Vol. 23(62), No.3. – P. 202-209.

The algorithm of modeling of transformation of light from the artificial object presented by the calculated theoretical spectrum through an optical path echelle spectrograph and its registration on a photodetector is described. The received image is presented in the form of standard FITS a file which can be used for a choice of an exposition and parameters of supervision of the real device, at a preset value of the relation a signal/noise.

Keywords: Echelle spectrum, extraction, emulation.

Поступила в редакцию 07.11.2010 г.