

УДК 52-17

## Численное моделирование спектральной аппаратуры

Т.А. Фатхуллин, М.В. Юшкин, В.Е. Панчук

Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167, Зеленчукский район,  
Карачаево-Черкесская республика, Российская Федерация  
timur@sao.ru

Поступила в редакцию 4 октября 2023 г.

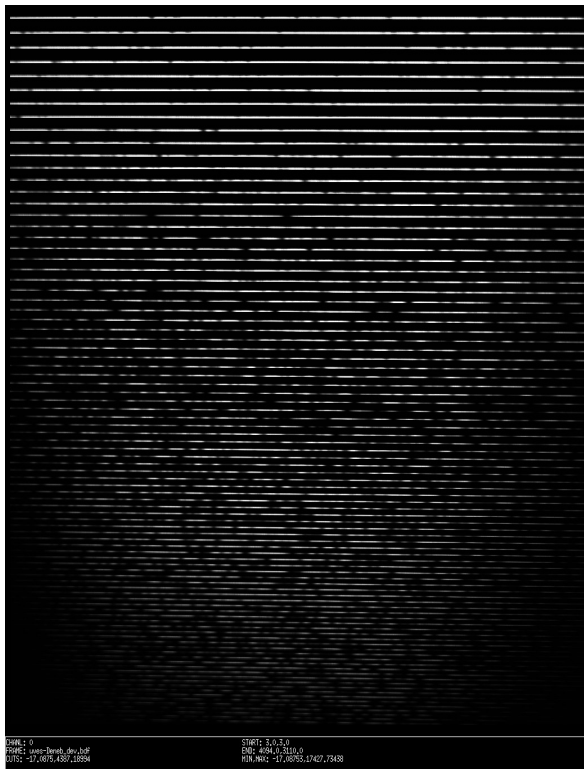
**Аннотация.** Мы представляем результаты разработки и применения метода численного моделирования спектральной аппаратуры высокого и низкого разрешения. Программная реализация основывается на методе трассировки лучей и выполнена на языке C++ с применением технологии nVidia CUDA (Compute Unified Device Architecture). Представлены результаты моделирования спектрографов как наземного базирования (БТА/NES – эшелле-спектрограф телескопа БТА), так и космического исполнения в рамках проекта “Спектр-УФ”. Показано, что полученные модельные двумерные эшелле и длиннощелевые спектры можно использовать для оценки энергетической эффективности предлагаемых оптических схем, для расчета характеристик градиентных просветляющих покрытий, а также для создания и отладки системы автоматической обработки наблюдательных данных задолго до запуска космических обсерваторий. На примере моделирования спектрографа NES демонстрируется анализ различий между “идеальной” оптической схемой и реальной технической реализацией, например в деталях изготовления нарезных эшелле-решеток, то есть их отличий от ожидаемых характеристик. В итоге мы показываем, что реализованная математическая модель является полезным и действительно мощным инструментом для проектирования астрономической спектральной аппаратуры, расчета и обоснования ее базовых характеристик, а также для планирования самого астрофизического эксперимента.

**Ключевые слова:** спектрографы, наземная и космическая астрономия, вычислительные методы

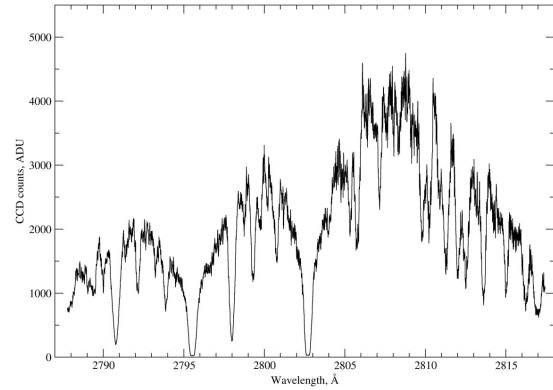
## 1 Введение

Современный уровень вычислительной мощности компьютерной техники, развитие математических методов и появление разнообразных программных технологий на их основе (например, CUDA<sup>1</sup>) позволили в некотором смысле по-новому взглянуть на процессы проектирования, изготовления и технического сопровождения наблюдательных инструментов в астрономии. Различного рода нюансы, возникающие в процессе решения наблюдательных задач, в особенности на пределе возможностей аппаратуры, также приводят к мысли о способах моделирования поведения или характеристик измерительных приборов заранее, до начала самого эксперимента, или же применять это моделирование, например, как одно из входных параметров в обработке и интерпретации полученных измерений (см, например, Ballester, Rosa, 1997; Ghavamian et al., 2009). Как нам видится, в первую очередь современные вычислительные возможности повлияли на развитие методов моделирования астрономического эксперимента в космических миссиях. Наше участие в проекте “Спектр-УФ” (Boyarchuk et al., 2013) вместе с представленными выше соображениями мотивировали нас, как разработчиков спектральной аппаратуры и, что немаловажно, возможных потребителей результатов наблюдений, на разработку математической модели проектируемых инструментов.

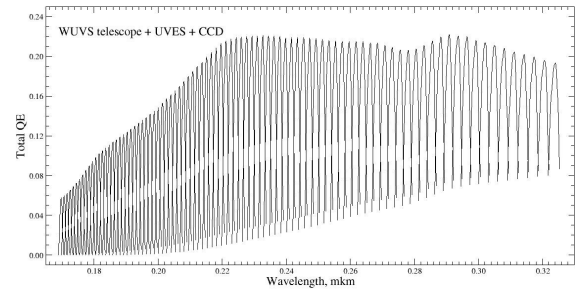
<sup>1</sup> <https://developer.nvidia.com/cuda-zone>



(a) Модельное ПЗС-изображение

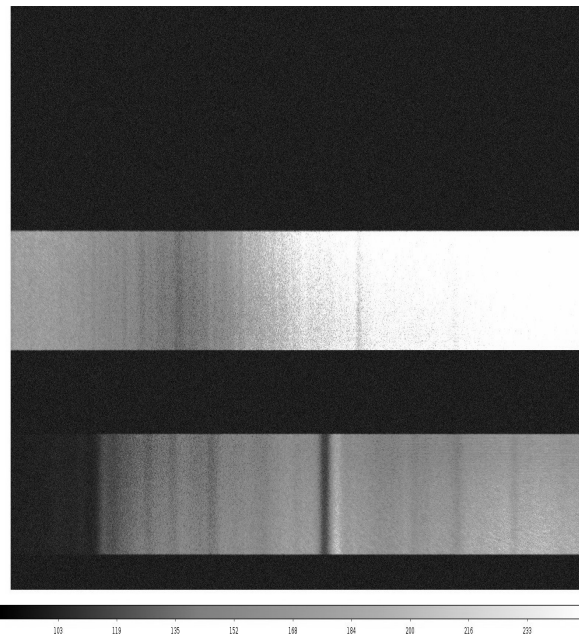


(b) Фотометрический разрез одного из спектральных порядков

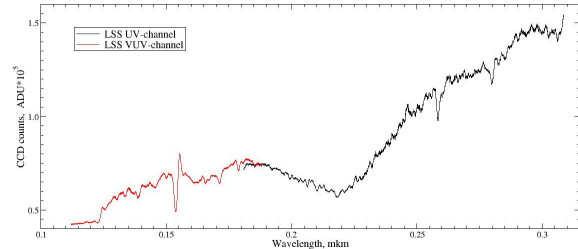


(c) Полная квантовая эффективность системы телескоп–спектрограф–приемник

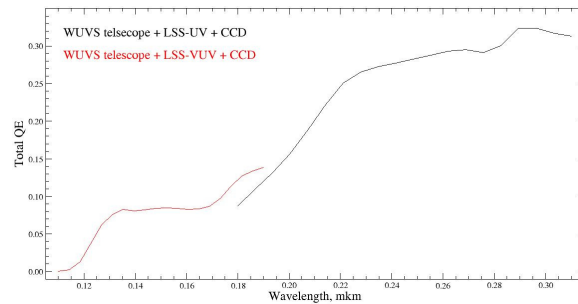
**Рис. 1.** Результаты моделирования спектрографа Спектр-УФ/UVES. Формат ПЗС – 4096 × 3112 элементов,  $4.5 \times 10^9$  лучей для трассировки, входной модельный спектр звезды спектрального класса A2 ( $T_{\text{eff}} = 9200$  K). Диапазон длин волн составляет 169–325 нанометров



(a) Модельное ПЗС-изображение



(b) Фотометрический разрез спектральных порядков

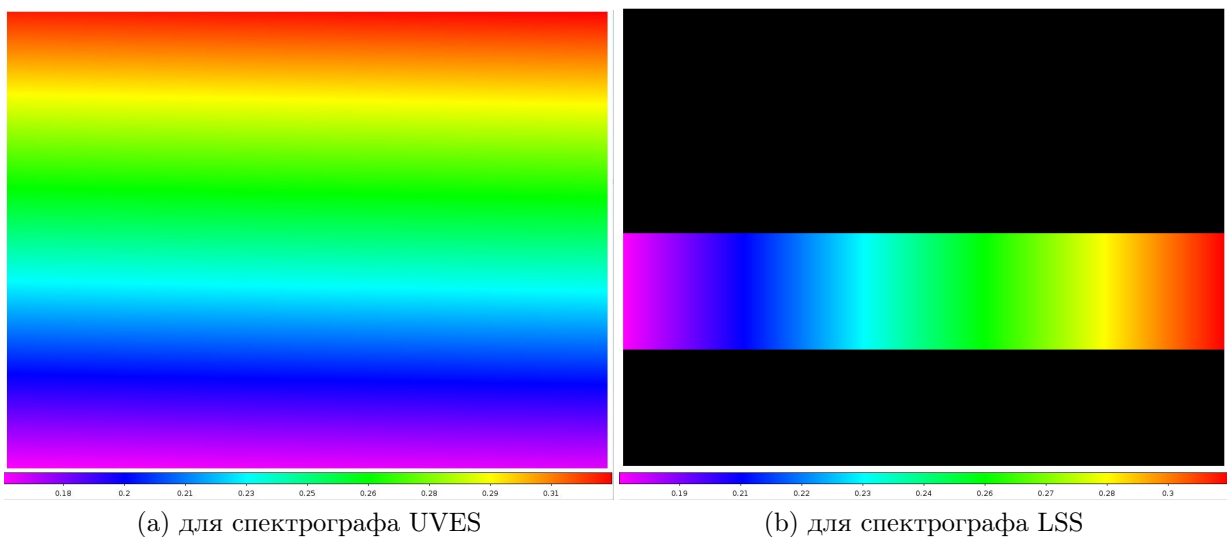


(c) Полная квантовая эффективность системы телескоп–спектрограф–приемник

**Рис. 2.** Результаты моделирования спектрографа Спектр-УФ/LSS. Формат ПЗС – 4096 × 3112 элементов,  $10^9$  лучей для трассировки, входной модельный спектр звезды спектрального класса A2 ( $T_{\text{eff}} = 9200$  K). Диапазон длин волн составляет 110–310 нанометров

## 2 Математическая модель

В ходе нашей работы над созданием спектральной аппаратуры проекта космической обсерватории “Спектр-УФ” прежде всего требовалось представить обоснование выбранной нами оптической схемы, в частности расчет полной энергетической эффективности разрабатываемых спектрографов. Мы подразумеваем здесь эффективность во всем рабочем спектральном диапазоне, а значит, с учетом эффективности предполагаемых дифракционных решеток. Кроме того, для более сложных схем, как, например, в случае спектрографа NES, важным становится расчет потерь внутри аппаратуры из-за виньетирования рабочего пучка. Наконец, для наземной аппаратуры существенным становится и учет потерь на входной щели, так как, в отличие от космических экспериментов, размер турбулентного диска звезды практически всегда гораздо больше ширины нормальной щели. В свою очередь, разработка совместно с группой конструкторов методики контроля изготовления аппаратуры, ее юстировки, а также нанесение изготовителем детекторов ПЗС (прибор с зарядовой связью) градиентных просветляющих покрытий потребовали знания точного расположения спектральных эшелле-порядков на плоскости приемника излучения. Исходя из перечисленного выше, мы можем сформулировать требования к нашей модели. Входными параметрами модели определим собственно оптические схемы телескопов и соответствующих спектрографов, коэффициенты пропускания или отражения оптических элементов, параметры дифракционных решеток, квантовую эффективность ПЗС-приемников и спектральное распределение энергии источника излучения (например, звезды). Для случая наземной аппаратуры дополнительным входным параметром выступает размер изображения турбулентного диска звезды. Тогда потребуем, чтобы в реализуемой модели конечными расчетными результатами были геометрическое положение спектральных порядков на приемнике, их кривизна и наклон спектральных линий в них, полная квантовая эффективность системы телескоп–спектрограф–приемник, и, наконец, модельное изображение получаемого в процессе наблюдений ПЗС-кадра. Подробные математические выкладки нашей модели и алгоритмические особенности представлены в работе Юшкин и др. (2016). Отметим лишь, что мы использовали метод трассировки лучей и скалярную теорию дифракционной решетки. В своей программной реализации мы использовали язык C++ и библиотеку CUDA. Технологии CUDA позволили нам применить алгоритмы так называемых массовых параллельных вычислений, что позволило резко, более чем на порядок, сократить время расчетов по сравнению с классическими последовательными реализациями.



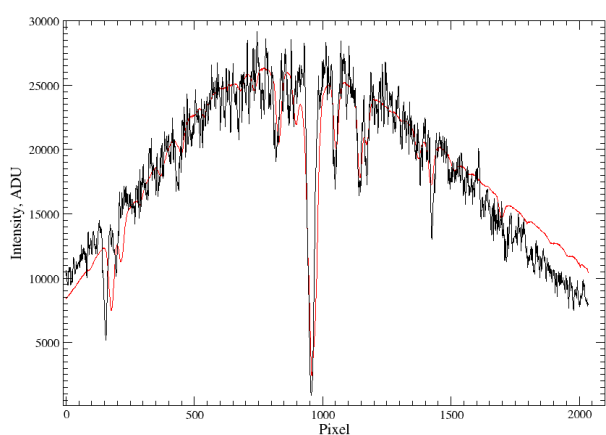
**Рис. 3.** Вычисленная из модели аналитическая зависимость  $\lambda = f(x, y)$  для нанесения просветляющего покрытия  $\text{HfO}_2$



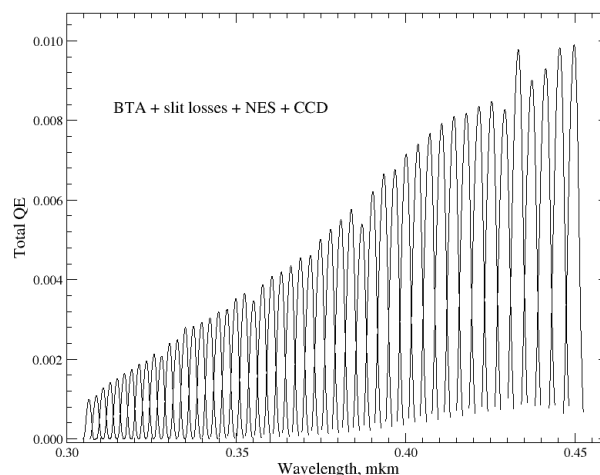
(а) Изображение эшелле-спектра, полученное на спектрографе NES



(b) Модельное изображение эшелле-спектра



(с) Сравнение фотометрических разрезов одного из порядков: линия красного цвета – модельный, черного – наблюдаемый. Эффективная ширина штриха – 60 % от номинальной (см. обсуждение по тексту)



(d) Полная квантовая эффективность с учетом потерь на входной щели спектрографа

**Рис. 4.** Изображение эшелле-спектра звезды  $\alpha$  Cyg в диапазоне длин волн 300–450 нм, полученное на спектрографе NES, и результаты моделирования. Формат ПЗС – 2048×2048 элементов, размер турбулентного диска звезды для модели  $\text{FWHM}_{\text{gauss}} = 1.5$  угловых секунды,  $10^9$  лучей для трассировки, входной модельный спектр звезды спектрального класса A2 ( $T_{\text{eff}} = 9200$  K)

### 3 Спектрографы космической обсерватории “Спектр-УФ”

В рамках проекта “Спектр-УФ” мы приняли участие в разработке спектрографов высокого разрешения UVES (Ultraviolet Echelle Spectrograph), VUVES (Vacuum Ultraviolet Echelle Spectrograph) и спектрографа умеренного разрешения LSS (Long-Slit Spectrograph). Концепция, оптические схемы и подробные параметры приведены в работе [Sachkov et al. \(2016\)](#). Оптические схемы UVES и VUVES отличаются только параметрами дифракционных решеток, поэтому приведем обсуждение только для варианта UVES.

На рис. 1 и рис. 2 представлены результаты моделирования для спектрографов UVES и LSS соответственно. Как было упомянуто выше, для увеличения квантовой эффективности на ПЗС-приемниках были нанесены градиентные просветляющие покрытия  $\text{HfO}_2$ . Для вычисления зависимости  $\lambda = f(x, y)$  (по сути толщины покрытия) как функции координат на плоскости детектора были использованы результаты нашей модели, а именно, точное положение порядков. На рис. 3 представлены такие зависимости для ПЗС-детекторов спектрографов UVES и LSS (для LSS покрытие наносилось только для длинноволнового канала). Отметим также немаловажный факт того, что полученные модельные изображения двумерных эшелле-спектров с соответствующим моделированием шумовых характеристик ПЗС-приемников можно использовать для разработки систем обработки наблюдательного материала еще до запуска космических миссий.

#### 4 Спектрограф NES телескопа БТА

NES – эшелле-спектрограф высокого разрешения, установленный на телескопе БТА (САО РАН). Оптическая схема, подробное описание и современное состояние прибора приведены, например, в работе Panchuk et al. (2017). NES был выбран нами как пример довольно сложной, а главное, используемой в реальных наблюдениях спектральной аппаратуры. Это позволило нам проверить нашу модель, определить границы ее применимости и подумать о направлениях возможного развития разработанного математического метода. На рис. 4 представлены результаты моделирования и сравнение их с реальными наблюдениями. Остановимся подробнее на сравнении. Прежде всего отметим, что первая попытка (не представлена на рис. 4) показала, что модель дает более “крутое” распределение энергии в порядках. Исследование этого различия привело нас к выводу о том, что основная причина лежит в отличии формы штриха дифракционной решетки от идеальной треугольной. Известно,

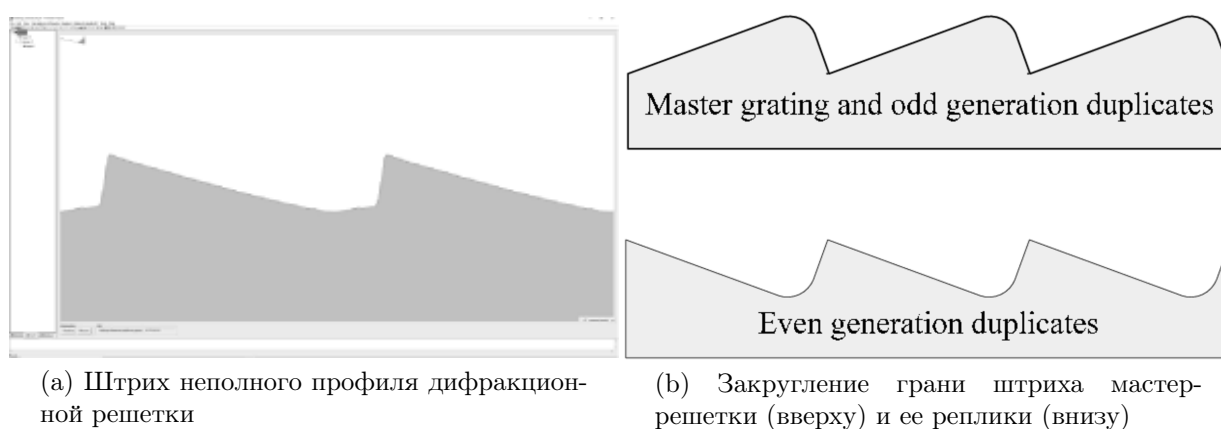


Рис. 5. Дефекты профиля штриха дифракционной решетки

что для уменьшения нагрузки на резец делительной машины при изготовлении решеток с малой плотностью штриха нарезка производится не в полный профиль (см. рис. 5a). Кроме того, существует эффект “закругления” вершин штриха при нарезке из-за неполного заполнения композитом реплики профиля мастер-решетки (см. рис. 5b). Эти эффекты мы смоделировали последовательным итерационным уменьшением ширины рабочей поверхности штриха эшелле-решетки в расчетах. Как видно из рис. 4, этим приемом нам удалось добиться удовлетворительного согласия модели с наблюдениями. Остаточное рассогласование (см. рис. 4c) мы интерпретируем как отклонения оси чипа ПЗС-приемника от оси его входного окна, отличия реальных углов положения эшелле-решетки и возможное уменьшение угла блеска от расчетных. Уменьшение угла блеска – известный факт в производстве решеток ввиду упругих деформаций алюминия при прохождении резца. Дальнейшие расчеты с введением в параметры модели таких отклонений позволят, как мы думаем, достичь еще большего совпадения реальных данных с нашими результатами, однако очевидно, это требует большого вычислительного времени.

## 5 Заключение

Мы представили результаты разработки и применения метода математического моделирования спектрографов космического проекта “Спектр-УФ” и наземного телескопа БТА. На примере приборов обсерватории “Спектр-УФ” мы продемонстрировали возможность использования результатов таких расчетов в процессе разработки аппаратуры, а в случае БТА/NES – еще и в процессе научного и технического сопровождения уже действующего прибора. Как нам представляется, такое моделирование является действительно полезным и мощным инструментом в проектировании, обосновании оптических схем и характеристик, инженерном и научном сопровождении астрономической спектральной аппаратуры.

## Литература

- Юшкин М.В., Фатхуллин Т.А., Панчук В.Е., 2016. *Астрофизический бюллетень*. Т. 71. № 3. С. 372–385. [Yushkin M.V., Fatkhullin T.A., Panchuk V.E., 2016. *Astrophysical Bulletin*, vol. 71, no. 3, pp. 372–385. (In Russ.)]
- Ballester P., Rosa M.R., 1997. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, vol. 126, pp. 563–571.
- Boyarchuk A.A., Shustov B.M., Moisheev A.A., Sachkov M.E., 2013. *Solar System Research*, vol. 47, p. 499.
- Ghavamian P., Aloisi A., Lennon D., et al., 2009. *Preliminary Characterization of the Post-Launch Line Spread Function of COS (No. COS ISR 2009-01(v1))*. Tech. Rep. Baltimore: STScI.
- Panchuk V.E., Klochkova V.G., Yushkin M.V., 2017. *Astron. Rep.*, vol. 61, no. 9, pp. 820–831.
- Sachkov M.E., Panchuk V.E., Yushkin M.V., Fatkhullin T.A., 2016. In Jan-Willem A. den Herder et al. (Eds.), *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray*. Proceedings of the SPIE, vol. 9905, id. 990537.

## Numerical simulation of spectral equipment

*T.A. Fatkhullin, M.V. Yushkin, V.E. Panchuk*

Special Astrophysical Observatory, Nizhnij Arkhyz 369167, Zelenchukskiy region, Karachai-Cherkessian Republic, Russian Federation

*timur@sao.ru*

**Abstract.** The results of numerical simulations of high- and low-resolution spectral devices are presented, as well as their real-life application. A ray-tracing method, C++ programming language, and nVidia CUDA (Compute Unified Device Architecture) technology were used for the computer program implementation. The results of simulations for the ground- (BTA/NES, Big Telescope Alt-azimuth Nesmith Echelle Spectrograph) and space-based (Spectr-UF) spectrographs are exposed. It is shown that the model two-dimensional echelle and long-slit spectra can be used to estimate the energy efficiency of the proposed optical design, to calculate the characteristics of gradient anti-reflection coatings, as well as to create and debug an automatic processing pipeline for observational data long before the launch of space observatories. By using the NES spectrograph simulations, an analysis of the differences between the “ideal” optical design and its real technical implementation is demonstrated. For example, some manufacturing details of ruled echelle gratings may cause significant differences from expected performance. As a result, we show that the implemented mathematical model is a useful and truly powerful tool for astronomical spectral equipment designing, calculating and justifying its basic characteristics, as well as for planning the astrophysical experiment itself.

**Key words:** spectrographs, space and ground-based astronomy, computational methods