

УДК 520.353

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА БЕСЩЕЛЕВОГО СПЕКТРОГРАФА С КОМПОЗИТНОЙ ГРИЗМОЙ

© 2024 Д. М. Ахметов^{1,2}, Э. Р. Муслимов^{1*},
Д. Ю. Харитонов^{1,2}, Э. Г. Ибатуллин^{1,2}, Н. К. Павлычева¹

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева,
Казань, 420111 Россия

²Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики»,
Казань, 420075 Россия

Поступила в редакцию 18 января 2024 года; после доработки 15 марта 2024 года; принята к публикации 29 марта 2024 года

Представлены результаты лабораторных исследований основных оптических характеристик бесщелевого спектрографа, разработанного для малого телескопа с диаметром главного зеркала 0.5 м и относительным отверстием 1 : 6.8. Спектрограф работает в диапазоне 450–950 нм и с полем зрения 35'6 × 7'2. Его отличительной особенностью является использование композитной гризмы, разбитой на две субапертуры с независимо оптимизированными параметрами. Измерения показывают, что за счет ее использования удается достичь спектральной разрешающей способности $R = 461–1041$ при дифракционной эффективности решетки до 45%. Показаны преимущества в оптических характеристиках по сравнению с классической гризмой и хорошее согласование измерений с результатами моделирования.

Ключевые слова: приборы: спектрографы — методики: спектроскопия изображения

1. ВВЕДЕНИЕ

Интерес к бесщелевой спектроскопии в астрономии обусловлен в основном возможностью одновременной регистрации спектров множества объектов и сравнительно высокой эффективностью (Outini and Copin, 2020; Panchuk et al., 2021). Кроме того, такой подход представляет интерес и с чисто инструментальной точки зрения, поскольку оптическая схема спектрографа несколько упрощается, уменьшаются его габариты и в ряде случаев облегчается переключение между изображающим и спектральными режимами инструмента. Поэтому, несмотря на риск снижения отношения сигнал–шум и перекрытия спектров от соседних объектов (Hoag and Schroeder, 1970), бесщелевой спектрограф становится приоритетным выбором для ряда приложений.

Преимущества бесщелевых инструментов и режимов раскрываются в применении к космической оптике. В качестве примеров можно привести широко известные инструменты: ACS на телескопе им. Хаббла (Pasquali et al., 2006), NIRISS на телескопе Джеймса Уэбба (Willott et al., 2022), а также режим бесщелевой спектроскопии космического телескопа GALEX (Grange et al., 2017). В каждом

случае работа с широким полем зрения позволяла проводить большие обзорные спектроскопические исследования, а сам инструмент оставался сравнительно простым и компактным. Последний пример можно отметить отдельно. Бесщелевая спектроскопия на GALEX была реализована с помощью единственного оптического компонента — гризмы, установленной в сходящемся пучке перед приемниками изображения.

Другой важной областью применения бесщелевых спектрографов можно считать спектроскопию на малых наземных телескопах. Например, в работах (Zhilyaev et al., 2013; Ludovici and Mutel, 2017) были продемонстрированы бесщелевые спектрографы, отличающиеся простотой конструкции, малыми габаритами и невысокими требованиями к точности наведения телескопа.

Как и в случае космических инструментов, наиболее привлекательной представляется оптическая схема на основе диспергирующего компонента, устанавливаемого непосредственно перед приемником в сходящемся пучке лучей. Однако такая компоновка ведет к росту aberrаций и снижению эффективности из-за изменения углов падения как по апертуре, так и по полю зрения, как было показано Moniez et al. (2021).

Ранее мы разработали и исследовали оптическую схему бесщелевого спектрографа для малого

*E-mail: ERMuslimov@kai.ru

телескопа, использующую для устранения указанных недостатков композитный голограммный оптический элемент (Muslimov et al., 2023). Такой элемент представляет собой голограмму, разделенную на субапертуры, в каждой из которых форма и профиль штрихов оптимизируются независимо для компенсации изменений условий восстановления голограммы. Концепция изготовления и методики расчета таких элементов были рассмотрены ранее в работе Muslimov et al. (2021) и других. С помощью моделирования было показано, что при использовании даже минимального числа субапертур и свободных коррекционных параметров можно добиться заметного выигрыша в эффективности и качестве изображения бесщелевого спектрографа. Соответственно, схема бесщелевого спектрографа рассматривалась как оптимальный кандидат для экспериментального подтверждения преимуществ концепции композитных голограммных элементов. Дальнейший план исследований предполагал проведение эксперимента.

В настоящей статье представлены результаты практической реализации разработанной ранее схемы бесщелевого спектрографа в виде лабораторного прототипа и исследования его основных характеристик. Статья организована следующим образом: в разделе 2 описано изготовление композитного диспергирующего элемента, построение лабораторного прототипа спектрографа на его основе и процесс измерений; в разделе 3 приведены результаты измерений дифракционной эффективности; в разделе 4 представлены измерения спектрального разрешения и разрешающей способности; в разделе 5 даны сравнительные оценки астигматизма спектрографа.

2. СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА СПЕКТРОГРАФА

Рассматриваемая оптическая схема бесщелевого спектрографа была разработана для сопряжения с серийным телескопом CDK500¹, выпускаемым PlaneWave InstrumentsTM (Adrian, MI, USA)². Телескоп построен на основе модифицированной схемы Долла–Киркхема с первичным зеркалом диаметром 508 мм при центральном экранировании 0.39. Фокусное расстояние телескопа составляет 3454 мм, что соответствует относительному отверстию 1 : 6.8. Спектрограф должен использовать номинальный ПЗС-приемник телескопа — SBIG STX-16803 форматом 4096 × 4096 × 9 мкм.

¹CDK500 Observatory System (online at <https://planewave.com/product/cdk500-telescope-system/> accessed on December 7, 2023)

²<https://planewave.com/>

Оптическая схема спектрографа представлена на рис. 1. В режиме прямых снимков оптическая система телескопа 1–3 формирует неразложенное изображение объекта в фокальной плоскости 4. В режиме бесщелевой спектроскопии перед фокальной плоскостью на расстоянии 160 мм устанавливается гризма — сочетание голограммной дифракционной решетки 5 и призмы 6 («grating + prism»). Она формирует спектральное изображение объекта в плоскости 7, где располагается приемник. Рабочий спектральный диапазон охватывает интервал от 450 до 950 нм, длина изображения спектра на приемнике составляет 28.8 мм, а поле зрения в пространстве предметов равно 35'6 × 7'2.

Гризма представляет собой склеенный компонент, состоящий из голограммной объемно-фазовой решетки с частотой штрихов 347 мм⁻¹, нанесенной на подложку из стекла ЛК7, и призмы из стекла ТФ8 с углами наклона поверхностей 4°47' и 6°85' и толщиной по оси 25 мм. Для практической реализации был выбран вариант композитного элемента, описанный в работе Muslimov et al. (2023) и обозначенный там как «упрощенный». Он состоит из двух субапертур, при его записи используется единственный вспомогательный элемент — корректирующая пластина, наклон полос оптимизирован для получения более высокой и равномерной дифракционной эффективности, а толщина структуры голограммы фиксирована и равна толщине серийно поставляемых фоточувствительных слоев. Далее мы будем называть такой диспергирующий компонент композитной гризмой.

Для записи композитной голограммной решетки использовалась установка, схема которой представлена на рис. 2. Параллельные пучки 1 получают, разделяя и затем пропуская через точечные диафрагмы и коллимируя излучение Ar-лазера на длине волны 514.5 нм. Пластина–корректор 2 служит для формирования формы штрихов, обеспечивающих коррекцию аберраций при работе в заданном сходящемся пучке. Пластина изготовлена из стекла К8 и вторая ее поверхность выполнена выпуклой с радиусом кривизны 3981 мм. Пластина в оправе крепится на поворотном столике 3 для установки расчетных углов разворота — 39°56'5 для субапертуры А и 40°58'1 для субапертуры В (см. рис. 1). Экран 4 служит для перекрытия одной субапертуры во время записи второй и устанавливается на стойке 5 с двумя точными линейными подвижками. Интерференционная картина формируется в плоскости 6, где устанавливается подложка со светочувствительным слоем — бихромированной желатиной (БХЖ). Углы падения двух записываемых пучков равны 2°53'3 и -7°14'1, что обеспечивает необходимый наклон полос.

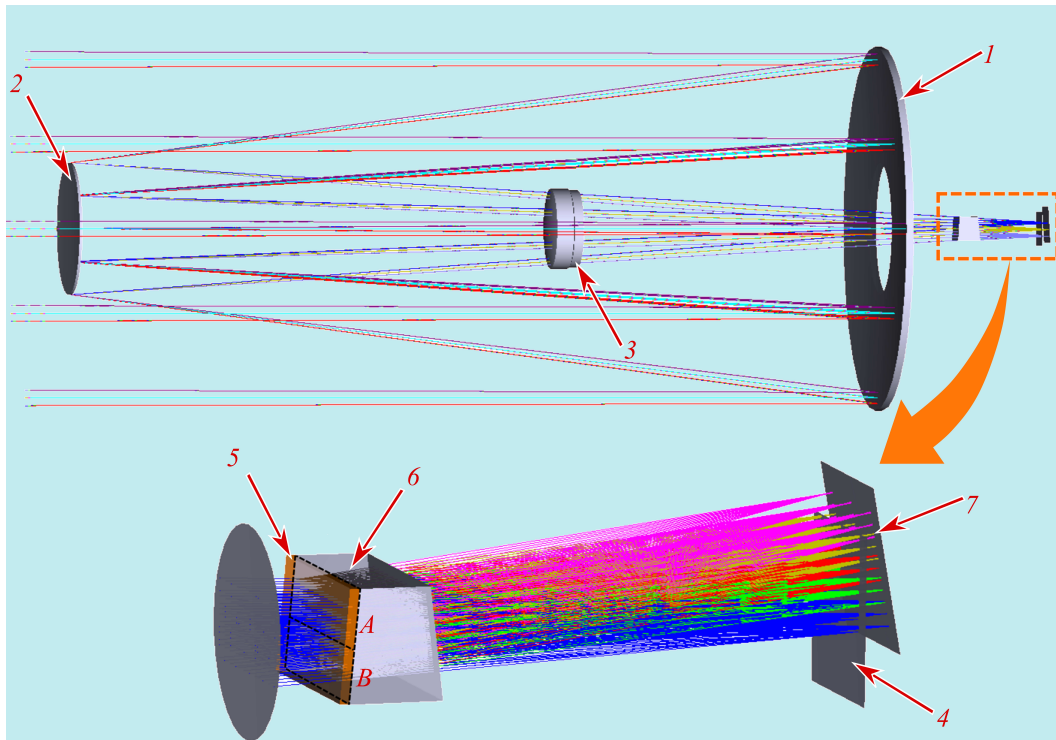


Рис. 1. Схема работы бесщелевого астрономического спектрографа с композитной гризмой: 1 — первичное зеркало телескопа, 2 — вторичное зеркало, 3 — линзовый корректор, 4 — плоскость неразложенного изображения, 5 — композитная голограммная решетка, 6 — призма, 7 — плоскость регистрации спектра.

Также для сравнительных исследований была изготовлена вторая гризма. Она использует идентичную призму и обеспечивает аналогичную линейную дисперсию, но голограммная дифракционная решетка записывается в симметричной схеме без корректирующего компонента, то есть имеет прямые в проекции и ортогональные в профиле полосы. Далее мы будем называть такую конфигурацию классической гризмой. Она также была описана в работе Muslimov et al. (2023), что позволит проводить сравнение значений основных характеристик. Призмы были изготовлены ООО «Электростекло» (г. Москва), запись голограммных решеток, нанесение просветляющих покрытий и склейка компонента осуществлялись АО «НПО ГИПО» (г. Казань). Необходимо отметить, что из-за технологических ограничений просветляющее покрытие удалось нанести только на вторую, несклеиваемую поверхность призмы, а поверхность подложки решетки остается без покрытия. Обе гризмы представлены на фотографиях (см. рис. 3).

Для исследования основных оптических характеристик спектрографа была собрана установка, представляющая собой его лабораторный прототип. Общий вид установки показан на рис. 4. В качестве источника излучения 1 используется монохроматор МДР-12 с галогеновой лампой, обладающей сплошным спектром излучения. Выход-

ная щель монохроматора 2 служит тест-объектом. С помощью проекционной системы из двух внеосевых параболических зеркал 3 ее изображение с увеличением -1^x формируется в промежуточной фокальной плоскости 4. Далее для симуляции пучка лучей на выходе телескопа используется проекционная система из двух объективов Индустар-51 ($f' = 210$ мм, $1:4.5$). Устанавливаемая между ними диафрагма 6 позволяет задать необходимое относительное отверстие формируемого сходящегося пучка. Гризма устанавливается в положении 7 на расчетном расстоянии от фокальной плоскости второго объектива. Спектральные изображения щели регистрируются в плоскости 8 с помощью фотоприемной матрицы форматом $256 \times 320 \times 5.8$ мкм, установленной в оправе с подвижками 9. При выбранных параметрах установки линейный размер геометрического изображения щели на приемнике составляет 0.65×0.048 мм, что соответствует угловому размеру $10'6 \times 0'79$. Угловое поле зрения установки меньше номинального значения для схемы спектрографа, однако в ходе моделирования (Muslimov et al., 2023) было показано, что изменение аберраций вдоль входной щели незначительно, и поэтому его исследование не является приоритетной задачей. Здесь и далее предполагается, что ось Z совпадает с направлением

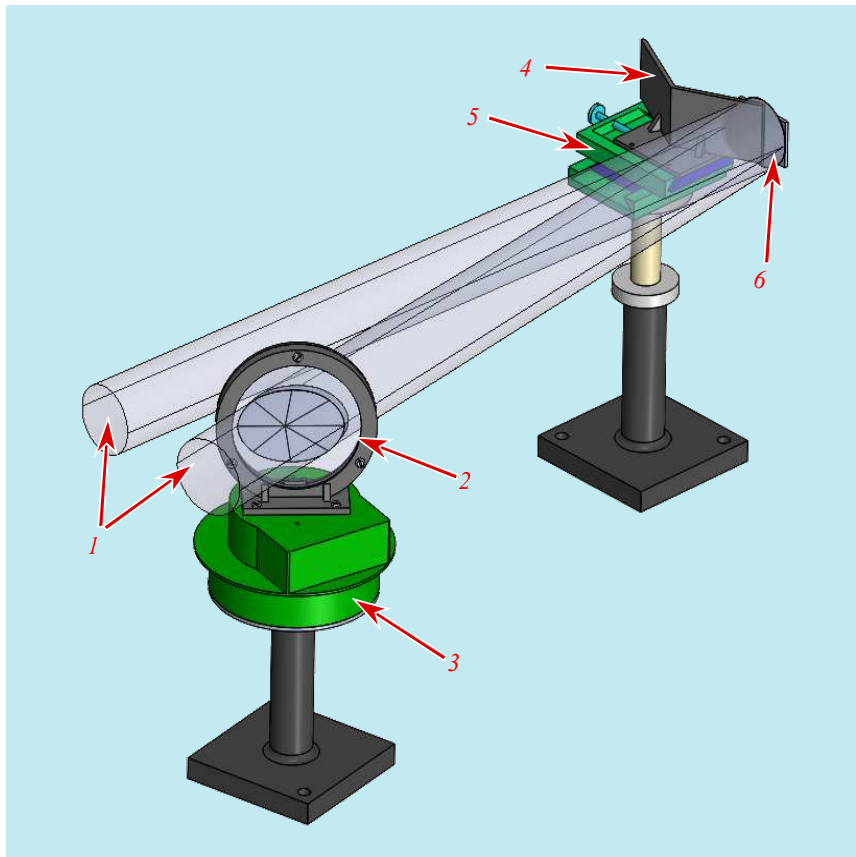


Рис. 2. Схема установки для записи композитной голограммной решетки: 1 — записывающие параллельные пучки, 2 — корректирующая пластина в оправе, 3 — поворотный столик, 4 — экран, 5 — стойка с точными линейными подвижками, 6 — подложка со светочувствительным слоем.

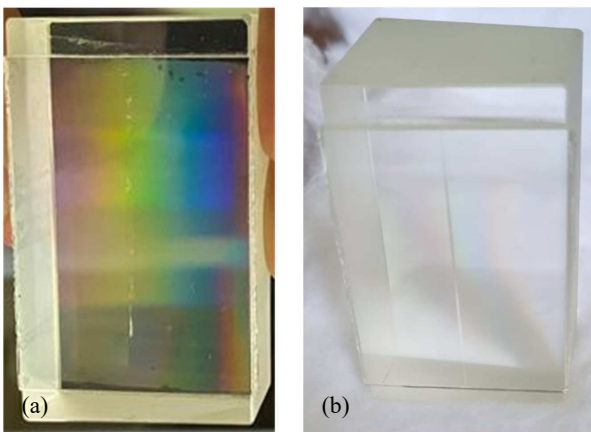


Рис. 3. Фотографии изготовленных гризм: (а) — классическая гризма, (б) — композитная гризма (хорошо видно разделение субапертур).

ем распространения излучения, ось X направлена вдоль щели, а плоскость OZY совпадает с плоскостью дисперсии.

В такой установке проводится сканирование рабочего спектрального диапазона с шагом 100 нм,

изображения щели регистрируются на светоприемной матрице. Отметим, что из-за ограниченного динамического диапазона приемника приходится устанавливать на выходе монохроматора нейтральные фильтры — НС-2 при измерениях без гризмы и НС-3 при измерениях с каждой из гризм. Примеры изображений щели, зарегистрированных с двумя гризмами, даны на рис. 5. Далее зарегистрированные изображения осредняются по нескольким кадрам (по трем для характеристик качества изображения и по девяти для расчетов эффективности), обрезаются и проходят обработку. Результаты определения каждой из оптических характеристик представлены в следующих разделах.

3. ДИФРАКЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Для определения дифракционной эффективности для каждого изображения щели (рис. 5) после вычитания фона и осреднения вычислялась суммарная интенсивность в изображении, пропорциональная потоку излучения, прошедшему через оптическую систему на данной длине волны. Далее

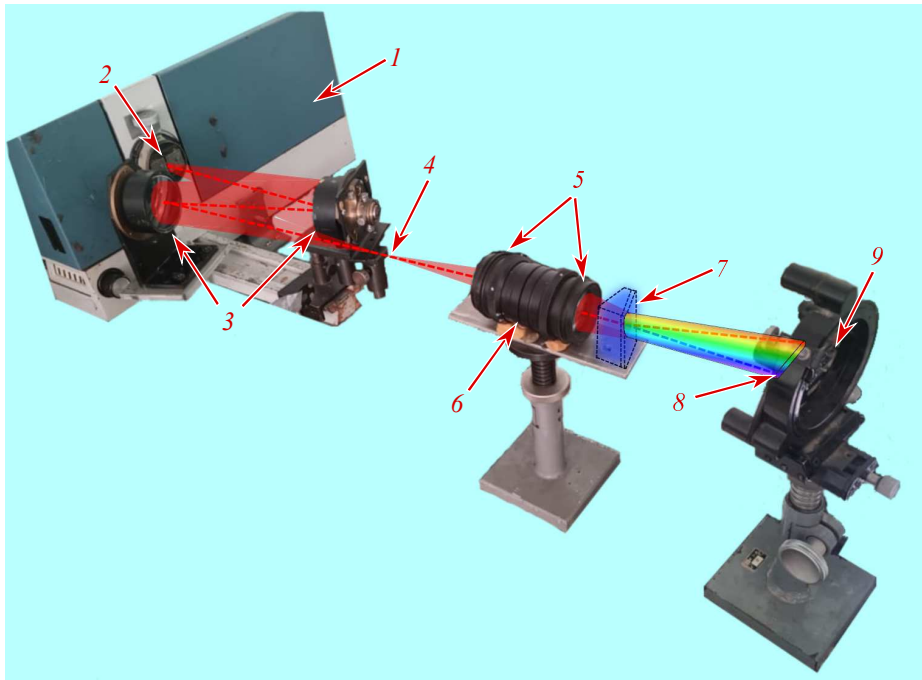


Рис. 4. Общий вид лабораторной установки для исследований характеристик гризм: 1 — монохроматор МДР-12, 2 — выходная щель, 3 — проекционная система, 4 — плоскость промежуточного изображения, 5 — объективы Индустар-51, 6 — плоскость апертурной диафрагмы, 7 — положение гризм, 8 — плоскость спектра, 9 — фотоприемная матрица в оправе.

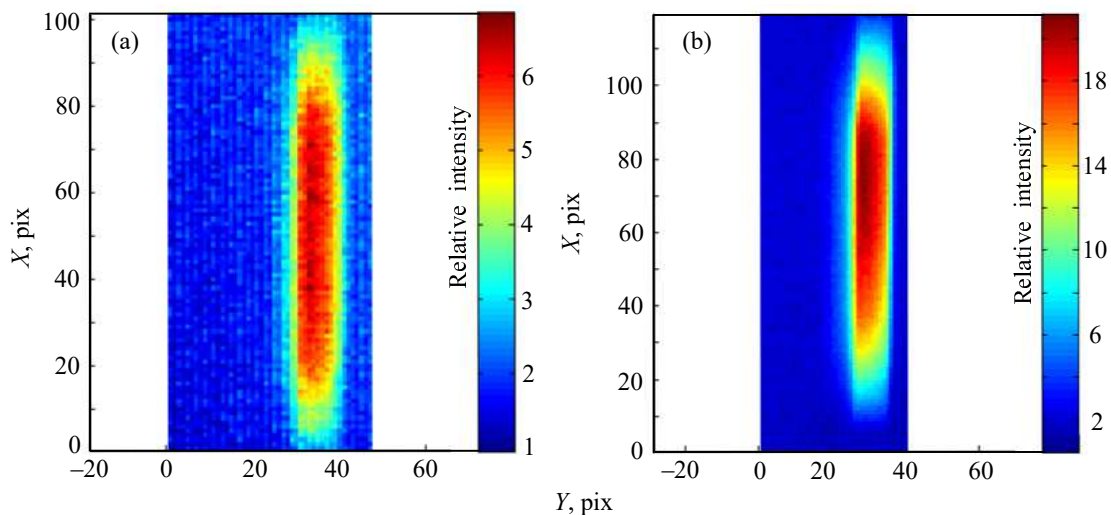


Рис. 5. Примеры изображений выходной щели монохроматора, зарегистрированные на длине волны 450 нм: (а) — с классической гризмой, (б) — с композитной гризмой.

значение корректировалось с учетом пропускания используемого нейтрального фильтра τ_{NS} согласно ГОСТ 9411–91³, материала призмы и подложки τ_{abs} согласно ГОСТ 3514–94⁴ и потерь на отражение τ_{surf} . Спектральные зависимости указанных

³ГОСТ 9411–91. Стекло оптическое цветное (Комитет стандартизации и метрологии СССР, Москва, 1992). Интернет-ссылка на документ: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294820/4294820910.pdf>.

коэффициентов пропускания для каждого материала представлены на рис. 6. Приведенные кривые рассчитаны для фактических значений толщины покровного стекла 3 мм и толщины призмы по оси 25 мм (расстояние по лучу изменяется в пределах

⁴ГОСТ 3514–94. Стекло оптическое бесцветное (Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, Минск, 1994). Интернет-ссылка на документ: <https://files.stroyinf.ru/Data/278/27895.pdf>.

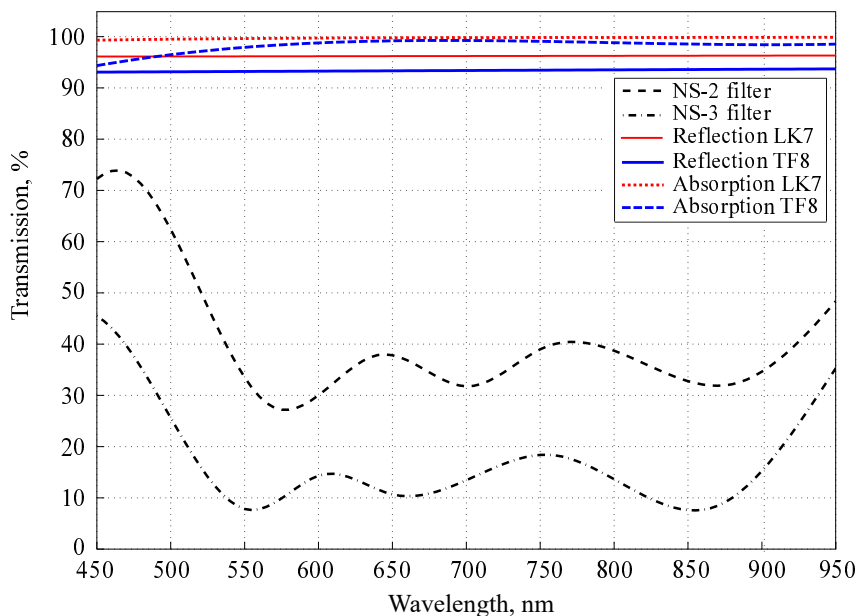


Рис. 6. Известные спектральные зависимости пропускания материалов, используемые для коррекции измерений.

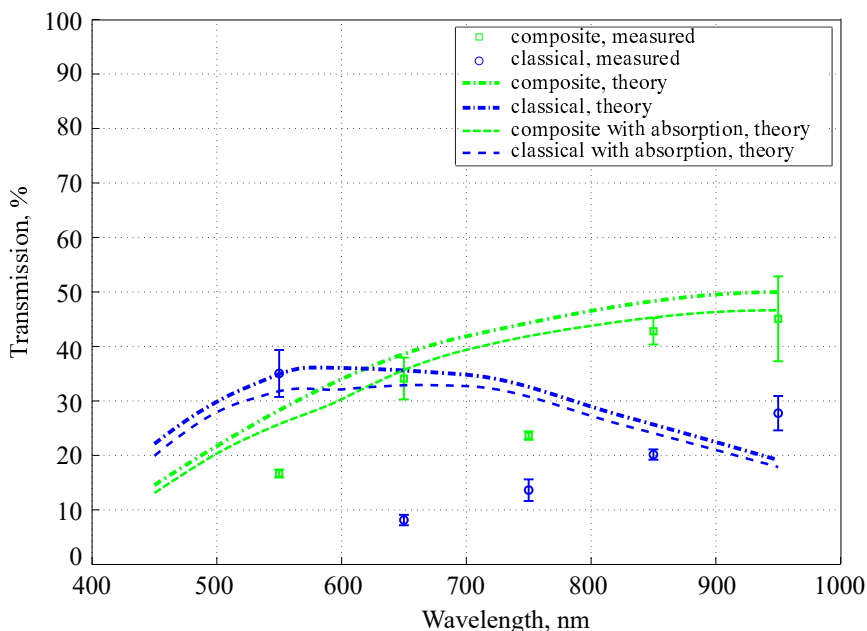


Рис. 7. Измеренные и расчетные спектральные зависимости пропускания для композитной и классической призм.

24.09–25.6 мм). Кривые для нейтральных светофильтров приведены для толщины 2 мм, указанной в стандарте. В эксперименте использовались светофильтры толщиной 2 и 6 мм и их сочетания, что учитывалось при расчете τ_{NS} в каждом случае. Тогда поток излучения, определяемый только эффективностью решетки, оценивается как

$$\Phi = \frac{\sum \sum I_{i,j} a_{\text{pix}}^2}{\tau_{NS} \tau_{\text{abs}} \tau_{\text{surf}}^2}, \quad (1)$$

здесь $I_{i,j}$ — измеренная интенсивность для пикселя с номером i, j , a_{pix} — размер пикселя. Таким образом, дифракционная эффективность оценивается как

$$\eta_{\text{cl}} = \frac{\Phi_{\text{cl}}}{\Phi_0}; \eta_{\text{co}} = \frac{\Phi_{\text{co}}}{\Phi_0}, \quad (2)$$

где индексы «0», «cl» и «co» обозначают измерения без призмы, с классической и композитной призмами соответственно.

Результаты вычислений представлены на рис. 7.

Интервалы ошибок, показанные на графике, соответствуют осреднению данных по девяти парам кадров для каждой длины волны. В частности, для классической гризмы на длине волны 650 нм этот показатель оказался сопоставимым с самой измеряемой величиной, поэтому данное измерение исключено из рассмотрения здесь и далее. Для сравнения на графике приведены данные моделирования для обоих случаев, полученные ранее в Muslimov et al. (2023). Данные приведены только для неполяризованного излучения, поскольку предварительные исследования (Akhmetov, 2023) показали, что поляризационная зависимость пропускания при такой малой частоте штрихов пренебрежимо мала. Следует учесть, что при моделировании не учитывалось поглощение самой объемно-фазовой решетки. Его можно оценить, используя данные из работы Redmond (1989) и применяя их для слоя бихромированной желатины толщиной 20 мкм при стандартной обработке. При коррекции расчетных спектральных зависимостей с учетом поглощения они лучше согласуются с результатами измерений (см. тонкие штриховые линии на рис. 7). Наиболее существенным отличием является заметное уменьшение экспериментально измеренного пропускания около 750 нм, сходное для обеих гризм. Возможным объяснением может быть влияние пропускания оптического клея. Как указывает ГОСТ 14887–80⁵, оптические клеи, в частности Бальзамин М-2, могут иметь повышенное поглощение в длинноволновой видимой области. Однако его величина и спектральное положение максимума могут изменяться в зависимости от условий склейки и не могут быть точно определены в данном случае.

Следует отметить, что наблюдаемое рассогласование между результатами моделирования и измерениями в целом характерно для объемно-фазовых решеток на БХЖ и вызвано высокой чувствительностью материала к внешним воздействиям при записи и последующей обработке голограммы. Полностью исключить данные эффекты не удастся даже в ведущих астрономических инструментах (Ishikawa et al., 2018). Поскольку в нашем случае рассогласование измерений с моделью не влияет на общий вывод об отношении пропусканий двух гризм, мы считаем его приемлемым для целей настоящего исследования. Таким образом, полученный результат подтверждает преимущества композитного голограммного элемента с точки зрения дифракционной эффективности и ее равномерности по рабочему спектральному диапазону.

⁵ГОСТ 14887–80. Клеи оптические. Типы (Государственный Комитет СССР по стандартам, Москва, 1988). Ссылка на интернет-ресурс: <https://files.stroyinf.ru/Data/236/23667.pdf>.

4. СПЕКТРАЛЬНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

Показатели спектрального разрешения спектрографа получены на основе экспериментального определения его аппаратной функции (АФ) — относительного распределения в монохроматическом изображении входной щели. На практике АФ вычисляется как распределение интенсивности в изображении щели вдоль оси Y (рис. 5), осредненное по пяти соседним строкам, центрированным относительно строки с максимальной пиковой освещенностью. Далее осредненное распределение нормировалось на максимум. Чтобы облегчить последующий анализ, для каждой такой экспериментальной АФ строилась сглаживающая гауссиана. На рис. 8 в качестве примера приведена пара АФ, полученных с помощью классической (а) и композитной (б) гризм на длине волны 450 нм. Экспериментальные данные показаны сплошной линией, сглаживающая кривая — штриховой.

На каждой длине волны наблюдения λ по полученной сглаживающей кривой был определен линейный предел разрешения $\delta y'$, равный ширине кривой на половине ее высоты. Соответственно, зная полную длину изображения спектра L_{sp} для всего рабочего диапазона длин волн $\lambda_1 \dots \lambda_2$, можно найти обратную линейную дисперсию и с ее помощью спектральный предел разрешения:

$$\delta\lambda = \delta y' \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{L_{sp}}, \quad (3)$$

откуда, в свою очередь, можно определить спектральную разрешающую способность как

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}. \quad (4)$$

Результаты вычислений показателей спектрального разрешения для обеих гризм представлены в таблице 1. В ней же приведены для сравнения результаты моделирования с использованием данных из работы Muslimov et al. (2023). При моделировании предполагалось, что входная щель засвечена равномерно, а ее ширина составляет 48 мкм. На практике ширина выходной щели монохроматора устанавливалась на значение 48 мкм, а увеличение проекционных систем 3 и 5 (рис. 4), номинально равное 1, контролировалось по неразложенному изображению, полученному без гризмы. Соответственно, ширина изображения щели, формируемого после объективов 5, составляла 48 ± 3 мкм. Можно отметить, что при установке на телескоп такая линейная ширина будет соответствовать угловому размеру $2''9$.

Расхождение измеренной спектральной разрешающей способности спектрографа с классической гризмой со значениями, предсказанными моделью, варьируется от 2.0 до 22.3% со средним значением в 7.9%. Аналогичные показатели

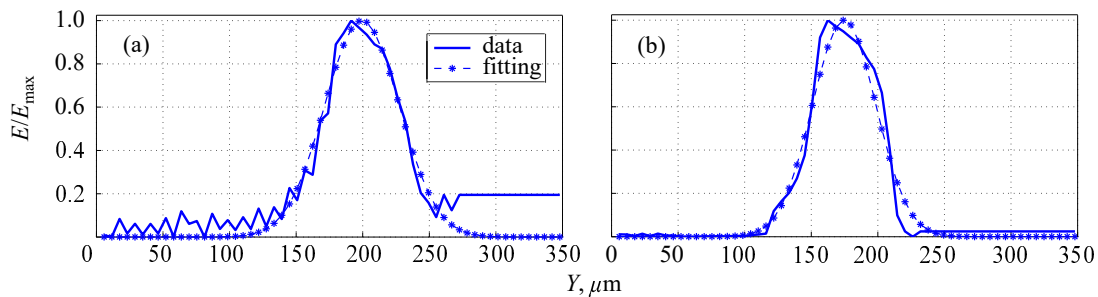


Рис. 8. Примеры аппаратной функции прототипа спектрографа, зарегистрированные на длине волны 450 нм при ширине входной щели 48 мкм: (а) — с классической гризмой, (б) — с композитной гризмой.

Таблица 1. Результаты измерений аппаратной функции и спектрального разрешения

λ , нм	450	550	650	750	850	950
Измеренные						
$\delta y'_{\text{class}}$, мкм	66.1	61.8	*	54.9	66.4	48.7
$\delta y'_{\text{comp}}$, мкм	56.3	68.1	64.3	52.7	60.5	52.6
$\delta \lambda_{\text{class}}$, нм	1.2	1.1	*	1.0	1.2	0.9
$\delta \lambda_{\text{comp}}$, нм	1.0	1.2	1.1	0.9	1.0	0.9
R_{class}	366.8	479.7	*	735.7	689.6	1051.0
R_{comp}	461.0	466.0	583.4	821.2	809.7	1041.2
Расчетные						
$\delta y'_{\text{class}}$, мкм	55.3	48.0	61.4	53.8	53.8	58.4
$\delta y'_{\text{comp}}$, мкм	52.9	52.0	49.7	54.0	48.4	54.7
$\delta \lambda_{\text{class}}$, нм	1.0	0.9	1.1	1.0	1.0	1.1
$\delta \lambda_{\text{comp}}$, нм	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9
R_{class}	438.4	617.3	570.3	751.0	851.1	876.3
R_{comp}	490.6	610.0	754.3	801.1	1012.9	1001.7

* — исключен из расчета из-за высоких шумов.

для варианта с композитной гризмой составили 2.5–23.4% и 10.9% соответственно. Наблюдаемые расхождения можно объяснить погрешностями изготовления и сборки лабораторной установки. Обращает на себя внимание превышение фактической разрешающей способности расчетного значения на длинноволновом краю в варианте с классической гризмой, что свидетельствует о развороте плоскости регистрации спектра. Таким образом, результаты измерений показателей спектрального разрешения показывают хорошее качественное и количественное согласие с результатами моделирования.

5. ОЦЕНКА АСТИГМАТИЗМА

Одним из ограничений бесщелевого спектрографа является риск перекрытия спектральных изображений соседних объектов. В частности, из-за астигматического удлинения изображений могут перекрываться спектры объектов, разнесенных по оси X . При использовании диспергирующего компонента в сходящемся пучке абберации, в том числе астигматизм, возрастают, и их коррекция является важным условием для реализации бесщелевого режима.

В разработанной установке достаточно сложно получить данные, характеризующие астигматическое удлинение изображения в формате, пригодном для сопоставления с моделью. Однако, используя распределение освещенности вдоль оси X в изображениях щели (рис. 5), можно оценить коррекцию астигматизма в схеме спектрографа. В данном случае распределение вычисляется для сечения с максимальным пиковым значением и осредняется по трем соседним столбцам для изображений как в схемах без гризм, так и с каждой из них. Примеры получаемого распределения освещенности после вычитания фона и нормирования на максимум показаны на рис. 9. Для облегчения чтения графика они дополнены регрессионными кривыми, однако при вычислениях данные кривые не используются.

Для численной оценки искажений в распределении освещенности вдоль щели, вносимых диспергирующим компонентом, используется среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (I_{\text{grism},j} - I_{0,j})^2}{n_{\text{pix}}}}, \quad (5)$$

где $I_{\text{grism},j}$ и $I_{0,j}$ — измеренные интенсивности для j -го пикселя в сечении с гризмой и без нее соответственно, а n_{pix} — число пикселей.

Результаты вычислений такого отклонения представлены в таблице 2. Из таблицы видно, что вариант с композитной гризмой вносит меньше искажений в распределение освещенности в сагиттальном сечении. Выигрыш по выбранной метрике достигает 19.9%.

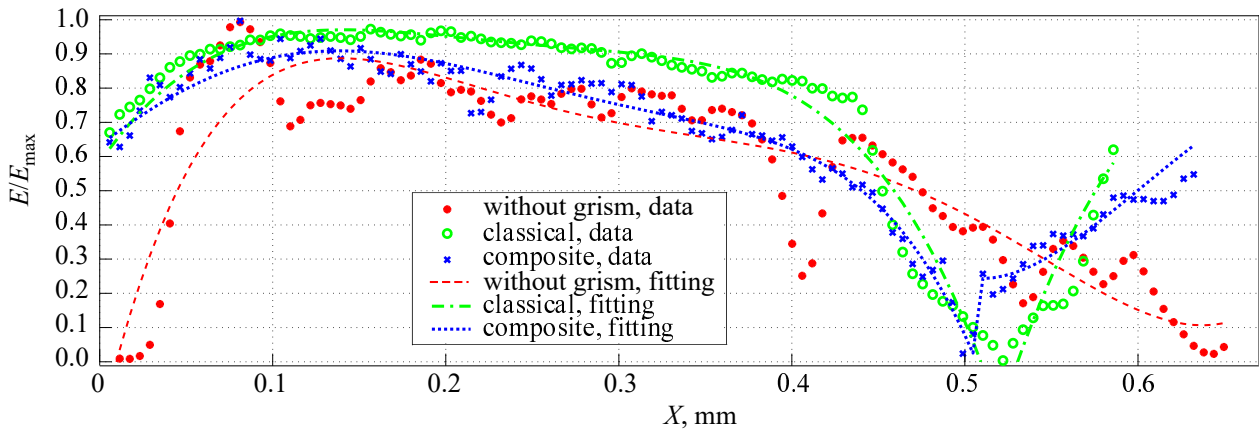


Рис. 9. Примеры распределения освещенности вдоль изображения щели, зарегистрированные на длине волны 850 нм.

Таблица 2. Измеренные отклонения освещенности вдоль изображения щели

λ , нм	450	550	650	750	850	950
σ_{class}	0.136	0.243	*	0.289	0.263	0.213
σ_{comp}	0.118	0.211	0.201	0.286	0.211	0.184

* — исключен из расчета из-за высоких шумов.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе экспериментально продемонстрированы преимущества использования композитного голограммного элемента в диспергирующем устройстве бесщелевого астрономического спектрографа. Практически реализована запись композитной объемно-фазовой решетки с двумя субапертурами с независимо оптимизированными параметрами, на основе ее сочетания с призмой построен лабораторный прототип спектрографа.

Экспериментально показано, что такой спектрограф, в сравнении с вариантом на базе классической гризмы, обладает преимуществом в спектральном пропускании за счет более высокой и равномерной по спектру дифракционной эффективности композитной гризмы, достигающей 45% на длинноволновом краю спектра. Также продемонстрировано, что бесщелевой спектрограф может достигать спектральной разрешающей способности $R = 461-1041$, обеспечивая преимущество до 25.7% над классической гризмой. При этом за счет коррекции астигматизма композитная гризма вносит меньше искажений в распределение освещенности вдоль щели, что указывает на выигрыш в пространственном разрешении. Все полученные результаты хорошо согласуются с расчетами и результатами моделирования.

В данном случае использовался упрощенный вариант композитного элемента, имеющий только

две субапертуры, записываемый с помощью простого корректора и отличающийся фиксированной толщиной структуры голограммы. Полученные результаты предоставляют достаточное экспериментальное подтверждение разработанной концепции композитных голограммных элементов и соответствующих методик расчета и моделирования. В дальнейшем, при усложнении конфигурации композитной голограммы, достигаемые оптические характеристики можно значительно повысить.

Разработанный бесщелевой спектрограф может представлять интерес для астрономии при использовании на малом телескопе и проведении спектроскопических обзоров. Его отличает конструктивная простота и малые габариты, поскольку оптическая схема включает единственный компонент, устанавливаемый непосредственно в сходящемся пучке на выходе телескопа, а в качестве приемника может использоваться штатный приемник, применяемый в режиме прямых снимков. При этом спектрограф позволяет работать с протяженным полем зрения, регистрируя спектры нескольких объектов с повышенным пропусканием и разрешением.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность своим коллегам: Н. А. Петрановскому из КНИТУ-КАИ, а также Ф. А. Саттарову, Н. М. Шигаповой, И. А. Гуськову и А. В. Синюткину из Государственного института прикладной оптики за помощь в изготовлении прототипа и проведении измерений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 21-79-00082.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. M. Akhmetov, A. N. Melnikov, E. Muslimov, et al., in *Proc. Intern. Conf. on Holography and Applied Optical Technologies (HOLOEXPO 2023), Sochi, Russia, 2023* (Publishing house of St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, 2023), pp. 52–58. [in Russian]
2. R. Grange, B. Milliard, J. Flamand, et al., *SPIE Conf. Proc.* **10569**, id. 1056908 (2017). DOI:10.1117/12.2307948
3. A. A. Hoag and D. J. Schroeder, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **82** (489), 1141 (1970). DOI:10.1086/129013
4. Y. Ishikawa, M. M. Sirk, J. Edelstein, et al., *Astrophys. J.* **869** (1), article id. 24 (2018). DOI:10.3847/1538-4357/aabfb
5. D. A. Ludovici and R. L. Mutel, *American Journal of Physics* **85** (11), 873 (2017). DOI: 10.1119/1.5000801
6. M. Moniez, J. Neveu, S. Dagoret-Campagne, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **506** (4), 5589 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab2109
7. E. Muslimov, D. Akhmetov, D. Kharitonov, et al., *Photonics* **10** (4), id. 385 (2023). DOI:10.3390/photonics10040385
8. E. Muslimov, N. Pavlycheva, I. Guskov, et al., *SPIE Conf. Proc.* **11871**, id. 1187112 (2021). DOI:10.1117/12.2596922
9. M. Outini and Y. Copin, *Astron. and Astrophys.* **633**, id. A43 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/201936318
10. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, and E. V. Emelyanov, *Astrophysical Bulletin* **76** (2), 196 (2021). DOI:10.1134/S1990341321020073
11. A. Pasquali, N. Pirzkal, S. Larsen, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **118** (840), 270 (2006). DOI:10.1086/498731
12. I. R. Redmond, Ph.D. Thesis, Heriot Watt University, UK (1989).
13. C. J. Willott, R. Doyon, L. Albert, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **134** (1032), 025002 (2022). DOI:10.1088/1538-3873/ac5158
14. B. E. Zhilyaev, A. V. Sergeev, M. V. Andreev, et al., *Kinematics and Physics of Celestial Bodies* **29** (3), 120 (2013). DOI:10.3103/S0884591313030057

A Prototype Slitless Spectrograph with a Composite Grism

D. M. Akhmetov^{1,2}, E. R. Muslimov¹, D. Yu. Kharitonov^{1,2}, E. G. Ibatullin^{1,2} and N. K. Pavlycheva¹

¹Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev, Kazan, 420111 Russia

²State Institute of Applied Optics, Kazan, 420075 Russia

We report the results of laboratory studies of the main optical properties of the slitless spectrograph developed for a small telescope with a 0.5 m-diameter primary mirror and a focal ratio of 1:6.8. The spectrograph operates in the 450–950 nm wavelength interval and has a field of $35'6 \times 7'2$. Its distinctive feature is the use of a composite grism subdivided into two subapertures with independently optimized parameters. Measurements show that the use of such a grism makes it possible to achieve a spectral resolving power of $R = 461–1041$ with the grating diffraction efficiency as high as 45%. We demonstrate that our solution provides better optical characteristics compared to the classical grism and that our measurements agree well with the results of modeling.

Keywords: *instrumentation: spectrographs—techniques: imaging spectroscopy*