

УДК 520.353

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ СПЕКТРОГРАФ УМЕРЕННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ

© 2016 Э. Р. Муслимов¹, Н. К. Павлычева¹, Г. Г. Валявин², С. Н. Фабрика^{2,3}

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КАИ), Казань, 420111 Россия¹

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

³Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Казань, 420008 Россия

Поступила в редакцию 2 июня 2015 года; принята в печать 19 июня 2016 года

Мы представляем новую схему спектрографа умеренного разрешения. Основу спектрографа составляет каскад последовательно расположенных объёмных голографических решёток, каждая из которых формирует индивидуальный спектр с разрешающей силой около 6000 с шириной полосы пропускания 80 нм. Решетки обеспечивают центрирование каждого из сформированных ими спектральных диапазонов таким образом, чтобы обеспечить равномерное покрытие как можно более широкой области длин волн. В настоящем исследовании удастся тремя решетками одновременно и без разрывов покрыть диапазон 430–680 нм. Собственная эффективность спектрографа от входной щели до ПЗС-приемника составляет характерную величину 60%, в максимуме она равна 75%. Обсуждаются достоинства и недостатки новой схемы спектрографа, а также астрофизические задачи, для которых этот спектрограф может быть использован.

Ключевые слова: *инструменты: спектрографы — методы: наблюдательные*

1. ВВЕДЕНИЕ

Для спектроскопии слабых объектов на крупнейших оптических телескопах применяются спектрографы низкого и умеренного спектрального разрешения с величиной разрешающей способности ($R = \lambda/\Delta\lambda$) от сотни до двух-трех тысяч. Среди наиболее известных и активно используемых приборов этого класса в качестве эталонов эффективности можно принять спектрографы FORS на телескопах VLT Европейской Южной Обсерватории [1, 2] и FOCAS телескопа Subaru обсерватории NAOJ [3]. Аналогичный спектрограф SCORPIO [4] активно используется на 6-м телескопе БТА САО РАН и имеет сопоставимые характеристики. Эти спектрографы демонстрируют эффективность, близкую к предельной. В частности, спектрограф FOCAS имеет коэффициент пропускания оптического тракта от щели до ПЗС-приемника (исключая ПЗС) до 82% в максимуме при полном покрытии всего оптического диапазона. Этот результат позволяет констатировать, что спектрографы, работающие в режиме низкого спектрального разрешения, в целом не требуют концептуальных изменений.

Для спектроскопии ярких объектов используются спектрографы с более высоким спектральным разрешением ($R > 10000$), которые основаны на более сложных оптических схемах, работающих с использованием эшелле-решеток. Основным преимуществом эшелле-спектрографа является высокое спектральное разрешение при относительно малом диаметре коллимированного пучка [5]. Однако подобные схемы имеют ограниченный коэффициент пропускания оптического тракта. Типичное его значение составляет лишь 8% [6]. Для современных образцов этот коэффициент может достигать 15–20% [7, 8], и это рассматривается как технологический предел. Резкий разрыв в значении коэффициента пропускания между спектрографами низкого/умеренного и высокого разрешения заставляет задумываться об альтернативных решениях, которые могли бы с большей эффективностью обеспечить полное покрытие визуального диапазона в режиме умеренного и более высокого спектрального разрешения. В этой статье мы представляем схему одного из таких возможных решений, основанную на объемно-фазовых дифракционных решетках.

Известно, что толстая объемно-фазовая дифракционная решетка может обладать высокой

¹E-mail: e0123@mail.ru

(до 100%) дифракционной эффективностью в узком спектральном интервале. Такая решетка может одновременно выполнять функции диспергирующего элемента и спектрального фильтра [9]. Эти свойства объемно-фазовых решеток можно использовать для построения схемы спектрографа с большим коэффициентом пропускания. Некоторые возможности и преимущества использования подобных оптических элементов в астрономических спектрографах были продемонстрированы, например, в работах [10, 11].

Предлагаемая оптическая схема спектрографа основана на использовании каскада из нескольких объемно-фазовых дифракционных решеток. Каждая из решеток каскада формирует спектр в индивидуальном спектральном диапазоне подобно тому, как дифракционный порядок эшелле-решетки формирует свой индивидуальный участок изображения спектра. Спектральные изображения, сформированные каждой из последовательно установленных в каскад дифракционных решеток, центрированы таким образом, чтобы обеспечить равномерное покрытие как можно более широкого спектрального диапазона. Мы демонстрируем, что такая концепция позволяет без значительной потери эффективности увеличить спектральное разрешение в несколько раз при сохранении одновременно регистрируемого спектрального диапазона, типичного для спектроскопии умеренного и низкого спектрального разрешения. На основе энергетических оценок эффективности оптической схемы мы также демонстрируем, что представленное решение является эффективной и недорогой альтернативой для спектрографов умеренного спектрального разрешения с разрешающей способностью R от 5000 до 10000. При тех же типичных спектральных диапазонах, что и в эшелле-спектроскопии умеренного спектрального разрешения, схема обладает гораздо большей эффективностью (в максимумах интервалов до 75%).

Программа, по которой ведется разработка инструмента, сформулирована в рамках следующих научных направлений: поиск очень массивных звезд и черных дыр промежуточных масс, исследование экзопланет и магнитометрия звезд. Эти направления (в особенности первые два) требуют создания эффективного спектрографа умеренного спектрального разрешения с максимальным коэффициентом пропускания оптического тракта. Очевидно также, что кроме этих направлений исследований, эффективный спектрограф умеренного спектрального разрешения потребуются для многих актуальных областей современной астрофизики. В данном исследовании мы ограничиваемся представлением концепции инструмента, не рассматривая конкретную схему телескопа, в паре с которым планируется использование

спектрографа. В Разделе 1 мы представляем оптическую схему спектрографа и обсуждаем ее детали. Вопрос дифракционной эффективности селективных голографических решеток в зависимости от длины волны в контексте их использования в астроспектроскопии обсуждается в Разделе 2. В Разделах 3 и 4 перечисляются актуальные задачи для спектроскопии умеренного спектрального разрешения, приводятся основные выводы исследования, обсуждаются достоинства и недостатки схемы, и дальнейшие шаги к ее улучшению.

2. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА СПЕКТРОГРАФА

В предлагаемой схеме в коллимированном пучке последовательно устанавливаются несколько решеток, каждая из которых работает в определенной спектральной полосе. Каждая из решеток выполняется в виде склеенного узла, состоящего из двух клиньев. Решетка наносится на внутреннюю поверхность узла, имеющую разворот в меридиональной и сагиттальной плоскостях. Внешние грани клиньев образуют плоскопараллельную пластинку. В рабочем +1-м порядке дифракции такая решетка формирует спектр в выделенной спектральной полосе, в 0-м порядке дифракции она работает как плоскопараллельная пластинка и мало влияет на распространение прочих спектральных составляющих излучения. Наклон поверхности решетки в меридиональной плоскости позволяет согласовать центры изображений спектров для разных полос с учетом разной дисперсии, а наклон в сагиттальной плоскости — сформировать в изображении спектра несколько строк, соответствующих различным спектральным полосам. В качестве коллимирующего и камерного объективов в такой схеме предпочтительно использовать линзовые ахроматизированные системы с максимально достижимым коэффициентом пропускания. Для иллюстрации предлагаемого принципа построения оптической схемы на рис. 1. приведены фотографии источника белого света, полученные в 0-м и +1-м порядках типичной объемной голографической решеткой.

В установке использована дифракционная решетка размером 40×40 мм с частотой штрихов $1200 \text{ штр. мм}^{-1}$, записанная на слоях бихромированной желатины (БХЖ) по стандартной технологии; в качестве источника излучения использован блок из 12 белых светодиодов, установленный параллельно плоскости решетки. Фотографии наглядно демонстрируют, что в 0-м порядке дифракции, наблюдаемом по нормали к поверхности решетки (рис. 1а), неразложенное излучение распространяется без искажений, в то время как в +1-м порядке наблюдаемом под углом приблизительно

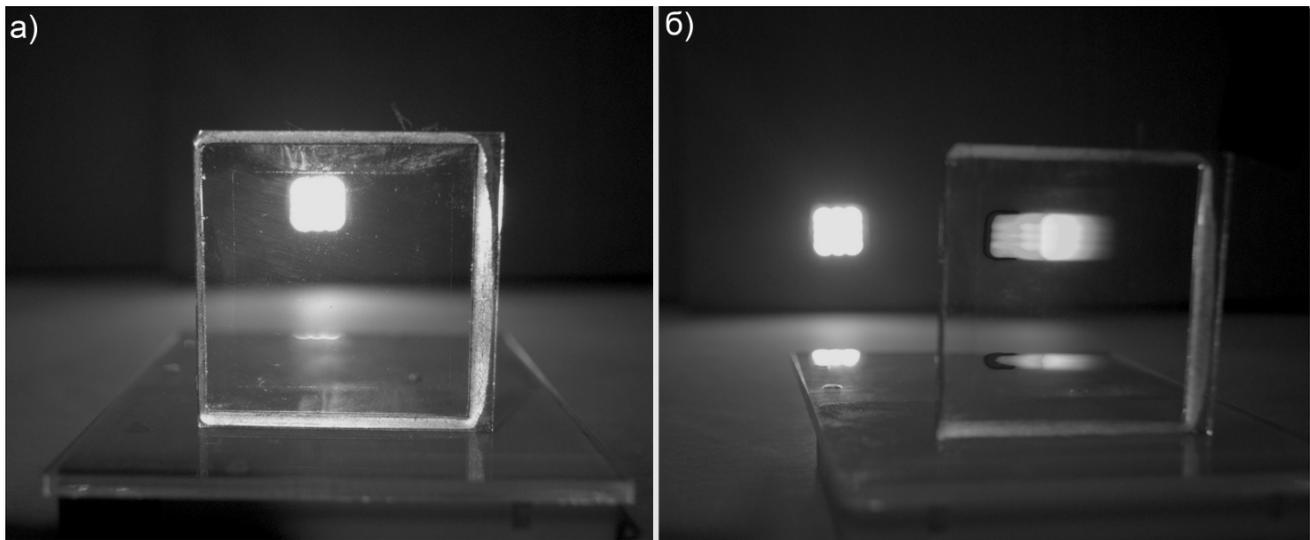


Рис. 1. Фотографии блока светодиодов, полученные через типичную объемно-фазовую голографическую решетку в 0-м (а) и +1-м (б) порядках дифракции. Наблюдаемые изображения демонстрируют диспергирующие и спектроделительные свойства объемной голографической решетки.

41°3 (рис. 1б), формируется спектр источника. Таким образом, каждая объемная голографическая решетка одновременно выполняет функции диспергирующего и спектроделительного элементов.

Алгоритм расчета оптической схемы спектрографа сводится к следующему. Исходными данными служат: рабочий спектральный диапазон, длина схемы, размеры фотоприемника и обратная линейная дисперсия. На первом этапе определяются спектральные полосы, на которые разбивается рабочий диапазон, и выбирается фокусное расстояние объективов. Далее для каждой решетки рассчитываются значения частоты штрихов и углов разворота в двух плоскостях, при которых обеспечивается требуемая дисперсия и разделение строк. На следующем этапе определяются конструктивные параметры объективов, и проводится их абберрационный расчет. Практика расчетов показывает, что необходимо дополнительно оптимизировать параметры объективов для схемы в сборе. Для найденных параметров рассчитываются показатели качества изображения. На завершающем этапе расчета параметры голографического слоя каждой дифракционной решетки оптимизируются для работы в выделенной спектральной полосе. Рассматриваемая концепция предполагает, что вне выделенной полосы дифракция на решетке практически не наблюдается. Чтобы проверить выполнение этого условия, целесообразно провести контрольное моделирование одним из численных методов.

Рассмотрим оптическую схему спектрографа для видимого диапазона 430–680 нм. Разобьем спектральный диапазон на равные спектральные

полосы 430–513, 513–597 и 597–680 нм. При проектировании будем ориентироваться на серийный матричный ПЗС-приемник с форматом чувствительной площадки 36×24 мм и размером элемента 5.2×5.2 мкм (отметим, что в финальной версии инструмента формат будет подгоняться под стандарты, принятые в обсерваториях, где может быть использован этот спектрограф). Примем целевое значение длины изображения спектра равным 30 мм для каждой полосы. Из условий ограничения габаритов и выполнения требований к линейной дисперсии примем фокусные расстояния коллимирующего и камерного объективов равными 170 мм. Относительное отверстие объективов выбиралось из условия согласования по апертуре с оптической системой телескопа БТА в первичном фокусе и с широкощельностью, равной единице. Значение числовой апертуры было принято равным 0.13, что даже немного превосходит числовую апертуру телескопа БТА [12]. Здесь следует специально оговорить, что реализовать оптическую схему спектрографа для выбранных параметров входного пучка достаточно сложно. Такое сочетание параметров выбрано в целях демонстрации практической работоспособности инструмента даже в случае, если он будет рекомендован для установки в фокусах телескопов с относительно большими числовыми апертурами и в условиях ограниченного пространства (например, в первичном фокусе БТА). Однако, после принятия решения о конкретном телескопе и фокусе, при которых будет устанавливаться спектрограф, параметры согласования апертур будут пересматриваться в зависимости от конкретной схемы.

Частота штрихов решетки и угол ее разворота в меридиональной плоскости могут быть приблизительно определены из следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} \phi'_{12} &= \phi'_{22}, \\ \phi'_{12} &= \phi'_{32}, \\ f'(\operatorname{tg}(\phi g_{13} - \phi'_{12} - \operatorname{tg}(\phi g_{11} - \phi'_{12}))) &= \\ f'(\operatorname{tg}(\phi g_{23} - \phi'_{22} - \operatorname{tg}(\phi g_{21} - \phi'_{22}))), & \quad (1) \\ f'(\operatorname{tg}(\phi g_{13} - \phi'_{12} - \operatorname{tg}(\phi g_{11} - \phi'_{12}))) &= \\ f'(\operatorname{tg}(\phi g_{23} - \phi'_{32} - \operatorname{tg}(\phi g_{31} - \phi'_{32}))), & \\ f'(\operatorname{tg}(\phi g_{13} - \phi'_{12} - \operatorname{tg}(\phi g_{11} - \phi'_{12}))) &= L_s. \end{aligned}$$

где ϕ'_{ij} — угол дифракции для длины волны j спектральной полосы i , равный

$$\phi'_{ij} = \arcsin(\lambda_{ij} N_i - \sin \phi_i) \quad (2)$$

Здесь N_i и ϕ_i — частота штрихов и угол падения для соответствующей решетки, f' — фокусное расстояние камерного объектива, L_s — длина строки в изображении спектра.

Задавшись малым углом наклона первой решетки, равным 10° , определим значения для начального приближения: $N_1 = 1405.4$ штр. мм $^{-1}$, $\phi_1 = -6^\circ 694$; $N_2 = 1386.7$ штр. мм $^{-1}$, $\phi_2 = -0^\circ 591$; $N_3 = 1401.4$ штр. мм $^{-1}$, $\phi_3 = 6^\circ 554$. Считая, что расстояние между строками в изображении спектра должно составлять не менее 2.2 мм, проводим численную оптимизацию системы и находим значения углов разворота решеток в сагиттальной плоскости, а также окончательные значения частоты штрихов и углов разворота в меридиональной плоскости: $N_1 = 1616$ штр. мм $^{-1}$, $\phi_1 = -10^\circ 007$, $\gamma_1 = 13^\circ 951$; $N_2 = 1337$ штр. мм $^{-1}$, $\phi_2 = 1^\circ 258$, $\gamma_2 = 9^\circ 116$; $N_3 = 1049$ штр. мм $^{-1}$, $\phi_3 = 15^\circ 053$, $\gamma_3 = 14^\circ 612$.

Камерный и коллимирующий объективы строятся по классической схеме триплета. Оба объектива оптимизируются с учетом специфических условий работы: коллимирующий — для расширенного спектрального диапазона и узкого поля зрения, камерный — для вынесенного вперед входного зрачка и широкого поля зрения. Для коррекции остаточных aberrаций камерного объектива в его схему необходимо ввести дополнительную линзу.

Общий вид оптической схемы спектрографа после оптимизации представлен на рис. 2. Дифракционные решетки в потоке установлены в обратном порядке — первой стоит решетка для длинноволновой полосы 597–680 нм, последней —

для коротковолновой полосы 430–513 нм. Общие габариты схемы составляют 755×440×170 мм. Для оценки качества изображения, достигаемого в данной схеме, рассмотрим точечные диаграммы спектрографа (рис. 3).

На рис. 4. приведен общий вид изображения спектра, формируемого спектрографом. Обратная линейная дисперсия составляет 2.61 нм мм $^{-1}$ для коротковолновой полосы 430–513 нм, 2.76 нм мм $^{-1}$ для средневолновой полосы 513–597 нм и 2.86 нм мм $^{-1}$ для длинноволновой полосы 597–680 нм.

Для определения спектрального разрешения, обеспечиваемого в данной схеме, найдем аппаратные функции (АФ) спектрографа. Аппаратные функции рассчитываются для входной щели шириной 30 мкм. Здесь следует отметить, что для обеспечения согласования входной щели спектрографа с изображением, формируемым конкретным телескопом (например, БТА), может возникнуть необходимость в использовании делителя изображения, подобного описанному в [13]. Однако еще раз заметим, что реализация инструмента при конкретном телескопе с конкретными фокусами и разрешенными диаметрами коллимированного пучка предполагает пересмотра принятых здесь вариантов преобразования пучка соответственно размеру входной щели и необходимости использования делителя изображений. Этот вопрос мы также оставляем для будущего исследования. Графики аппаратных функций для расчетных длин волн приведены на рис. 5. Спектральное разрешение, найденное по ширине АФ на половине максимума с учетом определенных ранее значений обратной линейной дисперсии, составляет: для коротковолновой полосы — 0.082–0.147 нм, для средневолновой полосы — 0.083–0.098 нм, для длинноволновой полосы — 0.086–0.124 нм. Следовательно, максимальная разрешающая способность [14] спектрографа для каждой полосы составляет соответственно 5243, 7192 и 7906. Легко убедиться, что эти значения заметно ниже предельной разрешающей способности при данной дисперсии и диаметре коллимированного пучка. Следовательно, разрешение спектрографа определяется преимущественно конечной шириной входной щели и aberrациями объективов. Далее для рассчитанной конфигурации оптической схемы необходимо определить оптимальные параметры голографического слоя каждой из решеток.

3. ДИФРАКЦИОННАЯ АКТИВНОСТЬ ОБЪЕМНО-ФАЗОВЫХ РЕШЕТОК

Для расчета параметров голографического слоя объемно-фазовых решеток (толщины t и глубины

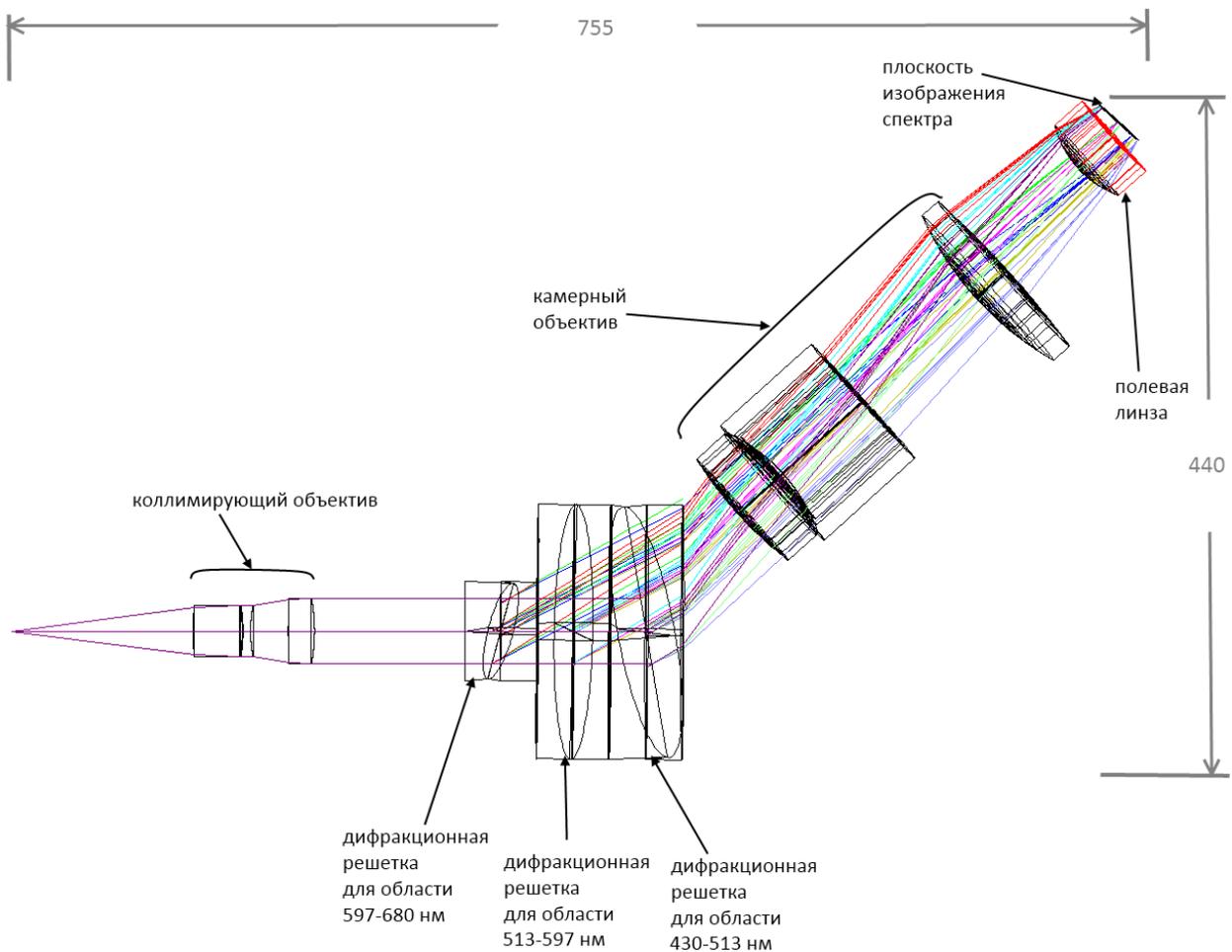


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема спектрографа. Каждая из трех объемно-фазовых дифракционных решеток каскада заключена между двумя идентичными клиньями. Благодаря высокой спектральной селективности объемной структуры такая решетка формирует спектр в выделенной полосе длин волн (430–513, 513–597 и 597–680 нм), а вне ее работает как плоскопараллельная пластинка. Числовая апертура прибора равна 0.13, фокусные расстояния камерного и коллимирующего объективов — 170 мм.

модуляции показателя преломления Δn) воспользуемся теорией связанных волн Когельника [15]. Она опирается на ряд допущений, однако позволяет рассчитать дифракционную эффективность объемной голограммы, используя простые аналитические соотношения.

Предполагается, что каждая решетка записывается двумя коллимированными пучками. Тогда положение полос решетки будет зависеть от углов падения записывающих пучков:

$$\psi = 90^\circ - \frac{\arcsin(\sin i_1/n) - \arcsin(\sin i_2/n)}{2}, \quad (3)$$

где i_1 и i_2 — углы падения, n — показатель преломления голографического слоя (для наиболее распространенного материала — бихромированной желатины, можно принять $n=1.51$). Угол

наклона полос должен соответствовать условию Брэгга

$$2 \cos(\psi - \phi) = \frac{N\lambda_2}{n}, \quad (4)$$

здесь λ_2 — средняя длина волны рассматриваемой спектральной полосы. Также следует учесть связь углов падения записывающих пучков и частоты штрихов решетки:

$$\sin i_1 - \sin i_2 = N\lambda_0, \quad (5)$$

где λ_0 — длина волны записи. Определив из уравнений (4)–(6) углы падения записывающих пучков и наклон полос решетки, можно перейти к оптимизации параметров слоя. Составляется простая

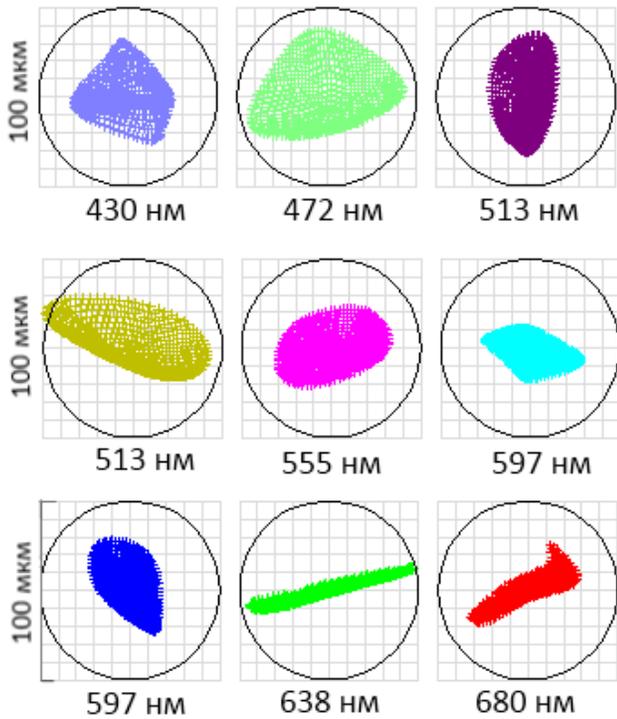


Рис. 3. Точечные диаграммы спектрографа для крайних и средних длин волн рабочих спектральных полос прибора. Размеры точечных диаграмм указывают на достаточно высокий линейный предел разрешения, слабо изменяющийся по спектру.

оценочная функция вида:

$$f_m(t, \Delta n) = \sum_{p=1}^k (\eta_s(t, \Delta n, \lambda_p) - \eta_{tar}(\lambda_p))^2, \quad (6)$$

где η_s — дифракционная эффективность для неполяризованного излучения, определяемая по формулам теории Когельника, η_{tar} — целевое значение дифракционной эффективности, определяемое прямоугольной функцией

$$\eta_{tar,i}(\lambda) = \begin{cases} 1, & \lambda_{i1} \leq \lambda \leq \lambda_{i3}, \\ 0, & \lambda < \lambda_{i1} \cup \lambda > \lambda_{i3}. \end{cases} \quad (7)$$

Минимизируя функцию (6) в области технологически реализуемых значений толщины слоя и глубины модуляции $10 \text{ мкм} < t < 100 \text{ мкм}$, $0.0005 < \Delta n < 0.13$ [11, 16], определяем оптимальные значения указанных параметров для каждой решетки: для коротковолновой полосы $t=11 \text{ мкм}$, $\Delta n=0.021$, для средневолновой полосы $t=15 \text{ мкм}$, $\Delta n=0.016$, для длинноволновой полосы $t=28 \text{ мкм}$, $\Delta n=0.011$. Полученные зависимости дифракционной эффективности от длины волны представлены на рис. 6.

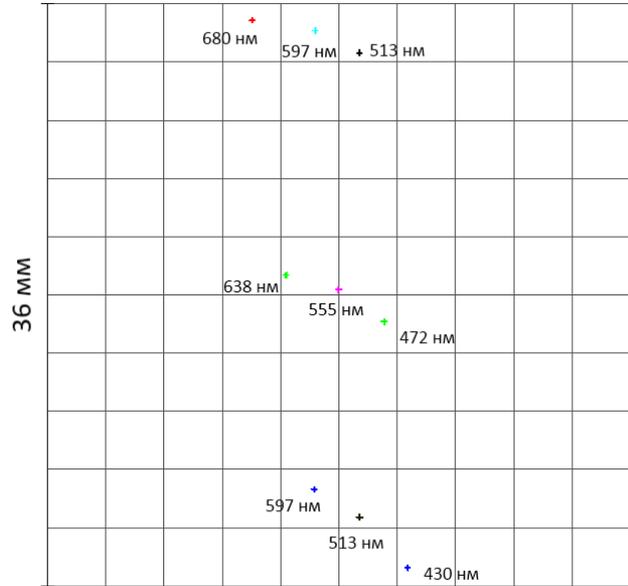


Рис. 4. Схема заполнения поля зрения спектрографа. На схеме показаны монохроматические изображения центра входной щели для средних и крайних длин волн трех рабочих спектральных полос: 430–513 нм, 513–597 нм и 597–680 нм. Центрировка строк разложения спектра (на схеме расположены вертикально) обеспечивается разворотом поверхностей каждой из дифракционных решеток в меридиональной плоскости. Расстояние между строками разложения составляет не менее 2.2 мм и обеспечивается разворотом решеток в сагиттальной плоскости. Формат кадра — 36 × 24 мм.

Приведенные результаты получены без учета разворота решеток в сагиттальной плоскости. В действительности же углы разворота имеют конечные значения, и для определения дифракционной эффективности следует моделировать случай конической дифракции с использованием численных методов. Для рассчитанных выше параметров такое моделирование было проведено методом RCWA (строгого анализа связанных волн) [17]. Результаты моделирования качественно подтверждают данные аналитического расчета — решетки имеют высокую дифракционную эффективность в сравнительно узкой спектральной полосе, близкой к расчетной. Однако вследствие наличия разворота в сагиттальной плоскости и влияния нерабочих порядков дифракции рабочая спектральная полоса решеток смещается в область коротких длин волн, а максимальная дифракционная эффективность снижается. В качестве примера на рис. 7. представлены графики спектральной зависимости дифракционной эффективности для средневолновой полосы, полученные с помощью численного моделирования и аналитических расчетов.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают возможность построения спектрогра-

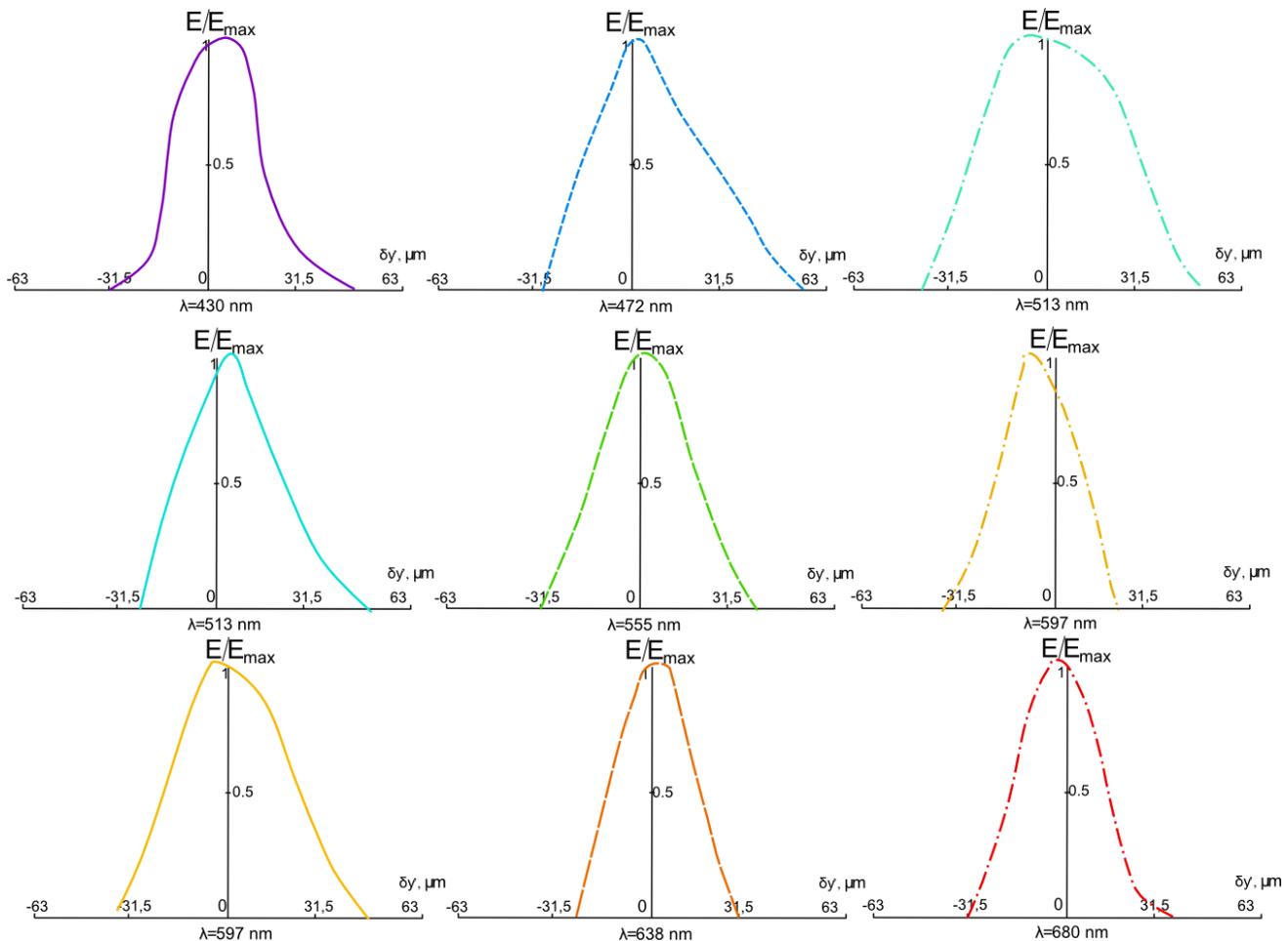


Рис. 5. Аппаратные функции спектрографа для крайних и средних длин волн рабочих спектральных полос прибора. Ширина входной щели 30 мкм. Линейный предел разрешения, определяемый как ширина АФ на половине максимума, составляет 31–56 мкм для коротковолновой полосы, 31–45 мкм для средневолновой полосы, и 30–34 мкм для длинноволновой полосы. Соответствующее спектральное разрешение равно 0.082–0.147 нм, 0.083–0.098 нм и 0.086–0.124 нм.

фа с селективными объемно-фазовыми решетками. При этом для точного определения параметров голографического слоя каждой решетки требуется проводить оптимизацию по точной численной модели.

4. АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ АСТРОФИЗИКИ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ УМЕРЕННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ

В этой части мы кратко обозначим наиболее актуальные задачи астрофизики, которые могут решать спектрографы такого типа. Это исследование ближней вселенной, галактик и звезд в этих галактиках. На таких расстояниях массивные звезды видны как отдельные объекты. Химическая эволюция галактик полностью определяется темпом формирования звезд, точнее, количеством массивных звезд в галактике. В свою очередь, эволюция массивных звезд определяется их химическим составом, что определяет темп потери

массы в их ветрах [18]. От этого процесса зависят темп образования и количество черных дыр и нейтронных звезд в галактиках. Для астрофизики принципиально знание, какие релятивистские объекты являются последним этапом жизни звезд конкретного типа: черная дыра, нейтронная звезда либо сопутствующий взрыв звезды не оставляет остатка («pair instability SN» [19]). Важно проведение наблюдений на всех этапах эволюции массивных звезд — от Главной последовательности до стадий LBV («Luminous Blue Variables»), WR (Wolf-Rayet), взрыва сверхновых и, наконец, до появления рентгеновских источников (черных дыр и нейтронных звезд в двойных системах). Оптические «двойники» рентгеновских источников (как правило, объекты от 17-й до 23-й звездных величин) вполне доступны для спектральных исследований в режиме умеренного спектрального разрешения. Переход от низкого ($R \sim 1000$) к умеренному ($R \sim 5000$ – 10000) разрешению при спектроско-

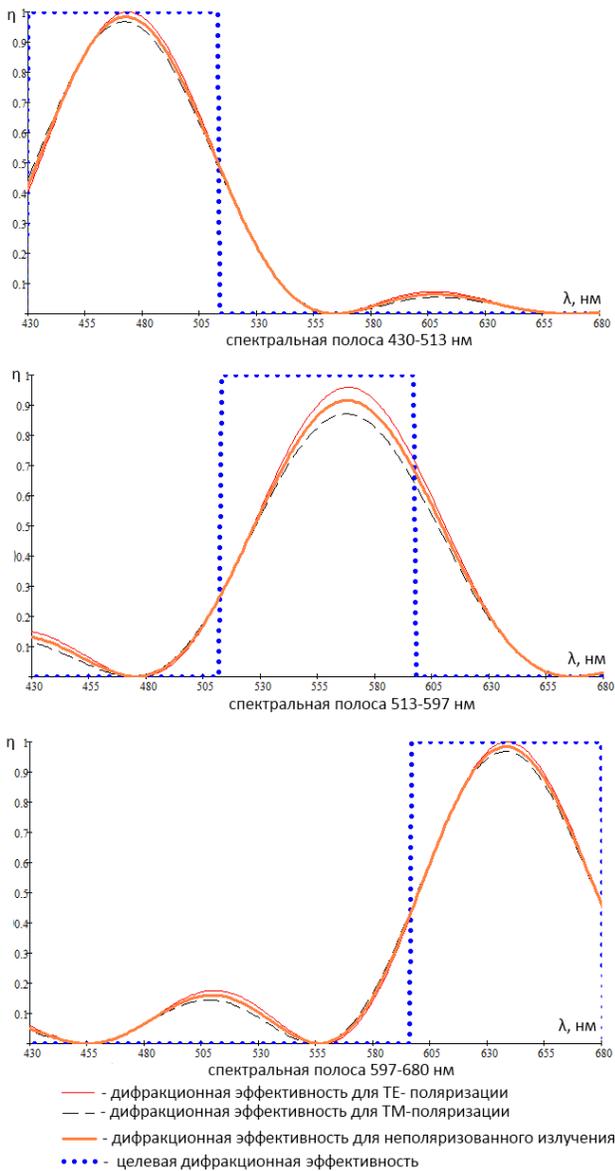


Рис. 6. Спектральные зависимости дифракционной эффективности объемно-фазовых решеток спектрографа. Расчет и оптимизация зависимости дифракционной эффективности выполнены с использованием аналитических соотношений теории связанных волн Когельника [15].

пии слабых объектов является принципиальным, так как появляется возможность разрешать спектральные линии массивных звезд, линии в спектрах эмиссионных галактиках, а также активных ядер галактик (AGN).

К направлениям, в которых предлагаемый спектрограф может быть наиболее эффективным, относятся исследование сверхновых, оптических «двойников» гамма-всплесков (важно получать спектры таких объектов в течение нескольких часов после их появления на небе), централь-

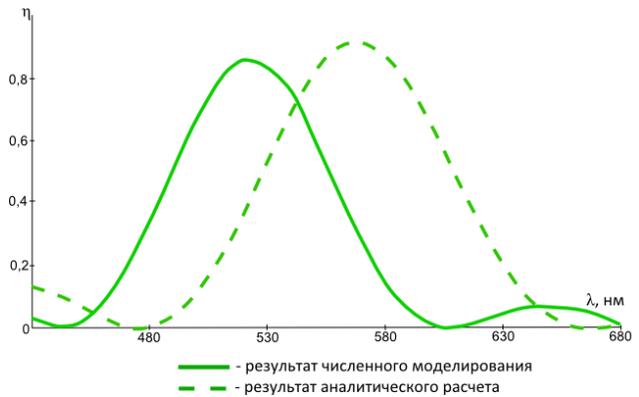


Рис. 7. Спектральная зависимость дифракционной эффективности решетки средневолнового канала спектрографа. Сплошная линия соответствует зависимости, рассчитанной с использованием метода строгого анализа связанных волн, штриховая — расчету по аналитическим формулам. Результаты расчета качественно согласуются в контексте поставленной задачи. Смещение положения максимума и его величины (~5%) объясняется явлением конической дифракции.

ных областей молодых скоплений звезд, ультра-ярких и гипер-ярких рентгеновских источников. При спектральном разрешении, соответствующем 50 км с^{-1} , уже возможно анализировать профили эмиссионных и абсорбционных линий ветров массивных звезд типа LBV, WR, эмиссионных сверхгигантов. Актуален поиск очень массивных звезд (VMS). Пока из наиболее массивных были открыты звезды до 200 масс Солнца [20]. Такие звезды могут формироваться в центрах молодых звездных скоплений. Время их эволюции менее трех миллионов лет. Далее звезда может стать так называемой черной дырой промежуточной массы (IMBH). Установление самого факта существования IMBH было бы значительным вкладом в самые разнообразные области современной астрофизики: формирование первых звезд в первые 500 млн лет после Большого Взрыва, рост сверхмассивных черных дыр в квазарах в первый миллиард лет, формирование карликовых галактик, звездных скоплений, формирование VMS.

Для спектрографов такого типа, работающего в широком диапазоне длин волн, вполне доступны исследования маломассивных компактных объектов в двойных системах (катаклизмические переменные) и одиночных, таких как белые карлики. Исследования магнито-индуцированных пятенных неоднородностей на поверхностях белых карликов [21], их химических составов и масс требуют эффективного спектрографа. Важной задачей является поиск и исследование экзопланет. Подобный спектрограф, как ожидается, будет иметь коэффициент пропускания оптического тракта не менее 50%, даже на сравнительно небольших те-

лескопах с диаметром зеркала 2-м будет возможно получать спектры экзопланет на основе отраженного от их поверхности сигнала в спектральных линиях ее родительской звезды [22, 23].

5. ДИСКУССИЯ И ВЫВОДЫ

В рамках настоящей работы предложена концепция спектрографа с высоким коэффициентом пропускания оптического тракта и умеренным спектральным разрешением для астрофизических исследований. Оптическая схема спектрографа построена на базе объемно-фазовых голограммных дифракционных решеток, выполняющих роль диспергирующих элементов и спектральных фильтров. Приведены результаты расчета и анализа схемы подобного спектрографа для диапазона 430–680 нм. Спектрограф формирует изображение спектра в виде 3 строк, соответствующих спектральным полосам 430–513, 513–597 и 597–680 нм, и обладает разрешающей способностью от 5200 до 7900 в зависимости от полосы. Результаты расчета дифракционной эффективности решеток показывают, что при технологически реализуемых параметрах голографического слоя можно достичь высокой эффективности в выбранной полосе и высокой спектральной селективности решетки. При этом для точного определения параметров слоя следует проводить оптимизацию с использованием точных численных методов моделирования дифракции. К достоинствам разработанной схемы можно отнести достаточно высокое спектральное разрешение, высокий коэффициент пропускания оптического тракта, а также умеренные габариты и относительную простоту используемых оптических компонентов. Максимальный коэффициент пропускания оптического тракта в центрах спектральных полос достигает 75% при номинальной эффективности 40–50%.

Недостатками новой схемы являются быстрый рост световых диаметров компонентов при увеличении дисперсии и/или количества строк разложения, что ограничивает дальнейшее увеличение спектрального разрешения. Также существенным недостатком схемы является наличие дифракции на решетках вне рабочей полосы, что может привести к заметным потерям в освещенности спектра (в первую очередь на краях строк разложения), а также к паразитной засветке приемника. Однако задача управления профилем дифракционной эффективности объемно-фазовых голограммных оптических элементов ранее успешно решалась в рамках различных приложений. В частности, в [24] описана методика расчета и изготовления объемно-фазовых голограммных фильтров, имеющих узкую

рабочую спектральную полосу с резкими границами и изменяемой шириной. В работе [25] приведены результаты расчета дифракционной эффективности отражательной объемно-фазовой решетки и продемонстрированы ее высокая спектральная селективность и крутизна границ рабочей полосы длин волн. Определенным недостатком представленной схемы является также малая ширина щели, с которой обеспечивается необходимое спектральное разрешение. Это может привести к необходимости создания делителя изображения, если будет планироваться работа инструмента в его настоящей оптической конфигурации на большом телескопе. Однако, как уже говорилось выше, эта проблема вполне решается пересмотром соответствующих параметров схемы. Кроме того, технологии изготовления делителей изображений на сегодняшний день хорошо развиты и также могут быть применены.

Следует также отметить, что на данном этапе работы специально не рассматривалась технология изготовления объемно-фазовых решеток. Предполагалось, что решетки записываются в параллельных пучках и, следовательно, имеют синусоидальное распределение показателя преломления. С другой стороны, существуют специализированные схемы записи, позволяющие управлять модуляцией показателя преломления и профилем дифракционной эффективности. Примерами таких схем могут служить запись во встречных пучках, предложенная в [26], и многоэкспозиционная запись, описанная в [27].

Приведенные примеры позволяют надеяться, что найденные недостатки схемы будут успешно устранены по мере продвижения проекта.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Ж.-П. Угоне (J.-P. Hugonin, Institut d'Optique, Palaiseau, France) за предоставленную программу Reticolo, позволяющую моделировать дифракцию на произвольных периодических структурах. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-50-00043).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. Appenzeller, K. Fricke, W. Fürtig, et al., *The Messenger* **94**, 1 (1998).
2. T. Szeifert, I. Appenzeller, W. Fuertig, et al., *Proc. SPIE* **3355**, 20 (1998).
3. N. Kashikawa, K. Aoki, R. Asai, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **54**, 819 (2002).
4. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).

5. D. F. Gray, *The observation and analysis of stellar photospheres*. (Cambridge University Press, New York, 1992).
6. S.-i. Wang, R. H. Hildebrand, L. M. Hobbs, et al., *Proc. SPIE* **4841**, 1145 (2003).
7. H. Dekker, S. D'Odorico, A. Kaufer, et al., *Proc. SPIE* **4008**, 534 (2000).
8. K. G. Strassmeier, R. Pallavicini, J. B. Rice, and M. I. Andersen, *Astronomische Nachrichten* **325**, 278 (2004).
9. H. J. Caulfield, *Handbook of optical holography* (Academic Press, New York, 1979).
10. S. C. Barden, J. A. Arns, W. S. Colburn, and J. B. Williams, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **112**, 809 (2000).
11. P.-A. Blanche, P. Gailly, S. L. Habraken, et al., *Opt. Eng.* **43**, 2603 (2004).
12. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, and I. D. Najdenov, *J. Opt. Technol.* **76**, 42 (2009).
13. S. Eikenberry, S. N. Raines, N. Gruel, et al., *Proc. SPIE* **6269**, 62694L (2006).
14. I. V. Peikhason, *Optics of spectral devices* (Mashinostroenie, Moscow, 1975).
15. H. Kogelnik, *Bell System Technical Journal* **48**, 2909 (1969).
16. T. Loukina, S. Massenot, R. Chevallier, et al., *Opt. Eng.* **43**, 2658 (2004).
17. N. Chateau and J.-P. Hugonin, *J. Opt. Soc. Am. A* **11**, 1321 (1994).
18. J. Puls, J. S. Vink, and F. Najarro, *Astron. and Astrophys. Rev* **16**, 209 (2008).
19. S. E. Woosley, S. Blinnikov, and A. Heger, *Nature* **450**, 390 (2007).
20. P. A. Crowther, O. Schnurr, R. Hirschi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **408**, 731 (2010).
21. G. Valyavin, D. Shulyak, G. A. Wade, et al., *Nature* **515**, 88 (2014).
22. A. Grauzhanina, G. Valyavin, D. Gadelshin, et al., *ASP Conf. Ser.* **494**, 289 (2015).
23. G. G. Valyavin, A. O. Grauzhanina, G. A. Galazutdinov, et al., *Astrophysical Bulletin* **70**, 466 (2015).
24. A. V. Lukin, *J. Opt. Technol.* **74**, 65 (2007).
25. S. C. Barden, J. B. Williams, J. A. Arns, and W. S. Colburn, *Opt. Eng.* **195**, 552 (2000).
26. E. A. Sokolova, *J. Opt. Technol.* **68**, 584 (2001).
27. X. Han, G. Kim, and R. T. Chen, *Opt. Eng.* **41**, 2799 (2002).

Moderate-Resolution Holographic Spectrograph

E. R. Muslimov, N. K. Pavlycheva, G. G. Valyavin, and S. N. Fabrika

We present a new scheme of a moderate-resolution spectrograph based on a cascade of serial holographic gratings each of which produces an individual spectrum with a resolution of about 6000 and a bandwidth of 80 nm. The gratings ensure centering of each part of the spectrum they produce so as to provide uniform coverage of the broadest possible wavelength interval. In this study we manage to simultaneously cover the 430–680 nm interval without gaps using three gratings. Efficiency of the spectrograph optical system itself from the entrance slit to the CCD detector is typically of about 60% with a maximum of 75%. We discuss the advantages and drawbacks of the new spectrograph scheme as well as the astrophysical tasks for which the instrument can be used.

Keywords: instruments:spectrographs—methods:observational