

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЗА АТМОСФЕРОЙ

© 2007 г. **В. Е. Панчук***, доктор физ.-мат. наук; **М. В. Юшкин***, канд. физ.-мат. наук;
Б. М. Шустов**, доктор физ.-мат. наук

* Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Зеленчукский район, поселок Нижний Архыз

** Институт астрономии РАН, Москва

E-mail: panchuk@sao.ru, maks@sao.ru, bshustov@inasan.ru

Рассмотрены схемы спектральной аппаратуры заатмосферных астрофизических экспериментов в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне 91–320 нм. Оценена эффективность (информативность) этих схем и сделан вывод, что для указанного диапазона длин волн метод сегментирования апертуры орбитального телескопа обладает заметным преимуществом. Показано, что для спектрографа с длинной щелью (СДЩ) космической УФ обсерватории “Спектр-УФ” метод сегментирования апертуры позволяет достичь высокой информативности спектральных наблюдений и обеспечивает конструктивное согласование спектрографа с другой научной аппаратурой. Проведен сравнительный анализ эффективности различных схем СДЩ и оценено место предложенного варианта прибора в ряду подобных.

Коды OCIS: 300.6540, 350.6090, 350.1260.

Поступила в редакцию 16.04.2007.

Введение

Роль спектроскопических наблюдений в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне за атмосферой подчеркивалась неоднократно [1–3]. Выполнены десятки экспериментов, включая и многолетние миссии, краткий обзор которых можно найти в [4]. Ниже рассмотрим некоторые вопросы повышения эффективности спектроскопической аппаратуры, предназначенной для наблюдений астрономических объектов со средним спектральным разрешением в УФ диапазоне за атмосферой.

Относительную эффективность разных экспериментов принято сравнивать в терминах эффективной площади S , т. е. площади, собирающей такое же число фотонов, какое регистрируется данным прибором, с учетом потерь на оптических элементах и квантовой эффективности приемника излучения (ПИ). Для астрономических объектов, имеющих незначительные угловые размеры, эту площадь можно рассматривать как эквивалент светосилы по потоку L (с точностью до квантовой эффективности ПИ Q). Очевидно, что отношение S к площади апертуры телескопа всегда меньше 1. В оптическом диапазоне это отношение может достигать значений, близких к 0,9. При продвижении в УФ область возникает ряд технических трудностей, приводящих к существенному уменьшению эффективной площади. Во-первых, в этом диапазоне с уменьшением длины волны существенно падает эффективность (коэффициент) отражения оптических покрытий. При этом появляется необходимость экономить на числе оптических поверхностей, участвующих в

формировании изображения. Соответственно, усложняется задача построения изображения (для рассматриваемых задач – изображения спектра) с минимальными искажениями. Во-вторых, пока не существует фотокатодов, обладающих приемлемым квантовым выходом сразу во всем рассматриваемом УФ диапазоне. Приходится либо мириться с этим, либо применять более сложные схемы с несколькими приемниками излучения. Дополнительные проблемы возникают в случае, когда питающая оптика (телескоп) является общей для нескольких научных приборов, работающих в смежных диапазонах. По указанным причинам рассматриваемый диапазон еще не освоен системами высокого спектрального разрешения.

Кроме эффективной площади (светосилы по потоку), критериями информативности спектроскопического эксперимента являются число одновременно передаваемых элементов спектра N , спектральное разрешение R и число M одновременно передаваемых элементов изображения. Строго говоря, сравнение эффективности спектрографов следует проводить по совокупности этих параметров.

В этом плане оценим эффективность нескольких спектроскопических экспериментов. Затем с характеристиками этих экспериментов попытаемся сравнить параметры нескольких вариантов оптической схемы спектрографа с длинной щелью (СДЩ¹) среднего разрешения, разрабатываемого в рамках проекта космической обсерватории “Спектр-УФ”.

¹ В англоязычной научно-технической литературе – LSS (Long Slit Spectrograph).

1. Эксперименты в УФ диапазоне

В работе [4] кратко описаны основные этапы развития УФ спектроскопии, там же можно найти ссылки на упоминаемые ниже эксперименты. Здесь остановимся лишь на описании основных параметров, характеризующих эффективность спектральных наблюдений в диапазоне длин волн, перекрывающемся с рабочим диапазоном спектрографа LSS.

УФ телескоп университета Дж. Гопкинса (HUT², первая миссия в 1990 г.) на длине волны $\lambda = 120$ нм имел эффективную площадь 35 см^2 , а в экстремальном УФ диапазоне (EUV) эффективность была еще ниже. Регистрация спектров в первом ($\lambda = 82\text{--}185$ нм) и втором ($\lambda = 42\text{--}92$ нм) порядках дифракции проводилась 1024-канальной линейкой фотодиодов, снабженной микроканальным усилителем с фотокатодом из йодида цезия CsI. Для второй миссии в 1995 г. вогнутые дифракционные решетки 600 штр/мм, работающие в схеме Роуланда, с покрытием из карбида кремния заменили на решетки с иридиевым и осмиевым покрытиями, отказавшись таким образом от наблюдений в диапазоне $\lambda = 42\text{--}92$ нм (EUV). Эффективная площадь телескопа диаметром 91 см возросла в 2,3 раза и составила 80 см^2 на $\lambda = 120$ нм. Этот факт иллюстрирует вывод о том, что универсализация технических решений в области $\lambda = 100$ нм неизбежно приводит к потерям в информативности. Параметры, характеризующие информативность спектральных наблюдений с помощью телескопа HUT, имеют значения $R = 400$, $N = 512$ и $M = 1$.

Одним из путей повышения информативности может быть отказ от универсализации. Изящным примером такого подхода является принцип сегментирования апертуры телескопа, реализованный, например, на спутнике экстремального ультрафиолета (EUVE³, $\lambda = 10\text{--}91$ нм). Апертура общей площадью 450 см^2 сегментировалась таким образом, что часть цилиндрической оптики скользящего падения обслуживала фотометрические каналы, часть – спектрограф низкого разрешения ($R = 275$). В длинноволновой части диапазона эффективная площадь телескопа EUVE составляла менее 1 см^2 .

Принцип сегментирования апертуры в полной мере использовался в проекте “Берклиевский спектрометр экстремального и далекого ультрафиолета” (BEFS⁴, $\lambda = 39\text{--}120$ нм, работал в космосе в 1993 и 1996 гг.) на телескопе с диаметром зеркала 1 м и относительным отверстием 1:2,7. Изображение объекта строилось в главном фокусе, где размещены собственно спектрограф BEFS и система слеже-

ния за объектом (поэтому диаметр пятна центрального экранирования главного зеркала был довольно большим – 0,5 м). Изображение строилось в круглой диафрагме, а расходящийся за ней пучок представлял собой конус, полный внутри из-за центрального экранирования. Этот конус перехватывался четырьмя (расположенными по кольцу) вогнутыми роуландовскими решетками, каждая пара которых строила изображение на одном из двух ПИ. Часть сегментированного апертурного кольца использовалась под систему контроля положения звезды на входной диафрагме спектрографа. Система контроля содержала внеосевое эллиптическое зеркало, строящее изображение звезды на отдельном ПИ. Таким образом, элементы системы слежения также были размещены в объеме спектрографа. Принцип сегментирования апертуры позволил реализовать достаточно высокое спектральное разрешение $R = 5000$ (так как эффективное относительное отверстие каждой из решеток намного ниже относительного отверстия телескопа). Зеркало телескопа имело иридиевое покрытие (эффективность отражения около 24%), что в сочетании с другими инертными покрытиями, применяемыми в экстремальном УФ диапазоне, обеспечило эффективную площадь системы телескоп-спектрограф BEFS от 2 до 6 см^2 в диапазоне $\lambda = 39\text{--}120$ нм.

Кроме BEFS, на этом же телескопе устанавливался спектрограф скрещенной дисперсии TUES⁵ (запуски в 1993 и 1996 гг.). Одновременно регистрировалось 25 порядков, из них 21 были информативны. С учетом этого обстоятельства параметры спектрографа были следующими: $N = 10752$, $R = 10\,000$, $M = 1$. Эффективная площадь составляла всего 2 см^2 .

спектрограф и камера прямых изображений STIS⁶ использовался на телескопе HST⁷ в период 1997–2004 гг. Эффективная площадь в режимах низкого ($R = 1000$) и среднего ($R = 10000$) разрешения на $\lambda = 120$ нм составляла 588 и 995 см^2 соответственно. Приемник излучения на микроканальной пластине с фотокатодом из CsI обеспечивал число одновременно регистрируемых элементов спектра $N = 512$ и число регистрируемых пространственных элементов изображения $M = 512$.

На спутнике, предназначенном для исследования далекого ультрафиолета (FUSE⁸, начало работы в 1999 г.), используются четыре телескопа, площадь каждого составляет 1365 см^2 , и каждый телескоп работает с отдельной вогнутой дифракционной решеткой. Две пары телескоп–решетка имеют покры-

² HUT – Hopkins Ultraviolet Telescope.

³ EUVE – Extreme Ultraviolet Explorer.

⁴ BEFS – Berkeley Extreme and Far ultraviolet Spectrograph.

⁵ TUES – Tübingen Ultraviolet Echelle Spectrograph.

⁶ STIS – Space Telescope Imaging Spectrograph.

⁷ HST – Hubble Space Telescope.

⁸ FUSE – Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer.

тие SiC (для работы в диапазоне $\lambda = 90\text{--}110$ нм) и две – LiF ($\lambda = 100\text{--}119$ нм). Каждая пара строит изображение двух участков спектра на одном из двух микроканаловых ПИ. Все четыре спектральных канала отъюстированы таким образом, что одновременно регистрируются четыре полосы спектра от одного объекта, выделение объекта выполняется четырьмя апертурными диафрагмами, расположенными на круге Роуланда. Каждый ПИ выполнен в виде двух сегментов размером 88×10 мм, позволяющих одновременно регистрировать полосу спектра длиной 170 мм. Один элемент разрешения составляет 6–10 пикселей детектора, спектральное разрешение $R = 20\,000$, полное число одновременно регистрируемых элементов спектра (с учетом процедуры объединения соседних пикселей – binding'a) составляет $N = 2000$. Голографические решетки компенсируют астигматизм частично (изображение точечного источника вытягивается до $15''\text{--}60''$), поэтому прием число одновременно регистрируемых элементов изображения $M = 1$. Эффективная площадь каналов изменяется от 4–6 см² в диапазоне $\lambda = 90\text{--}100$ нм до 15–25 см² в диапазоне $\lambda = 100\text{--}119$ нм.

Эксперимент GALEX⁹ не является в полном смысле спектроскопическим. Основная задача этой обсерватории – обзор всего неба в УФ диапазоне. Однако для спектроскопических задач телескоп снабжен объективной призмой, позволяющей получать спектры низкого разрешения одновременно всех объектов, находящихся в поле зрения телескопа. Разделение каналов дальнего и ближнего УФ диапазона происходит не методом сегментирования апертуры телескопа, а с помощью дихроичного светоделителя. Подобный светоделитель планируется использовать и в предлагаемой ниже трехканальной схеме спектрографа LSS для разделения второго и третьего каналов.

В табл. 1 приведены оценки параметров эффективности вышеперечисленных спектрографов. Для спектрографа STIS приведены две группы параметров, соответствующие применению двух сменных решеток G140L и G140M.

Общими признаками перечисленных схем является стремление увеличить эффективность за счет применения различных комбинаций фотокатодов и покрытий оптических элементов. Отметим, что произведение эффективной площади S на спектральное разрешение R для спектрографов, работающих с метровыми зеркалами (HUT и BEFS), практически сохраняется, хотя на BEFS применено сегментирование апертуры. В случае BEFS сегментирование апертуры позволило найти компромисс между компактным телескопом с большим относительным

⁹ GALEX – Galaxy Evolution Explorer.

Таблица 1. Параметры эффективности $W = SRNM$ различных экспериментов. Для спектрографа LSS указаны средние параметры R и S в трехканальной схеме

	S , см ²	R	N	M	$\lg W$
STIS	588	10000	512	512	12,2
LSS	660	2800	3946	150	12,0
STIS	995	1000	512	512	11,4
FUSE	25	20000	2000	1	9,0
GALEX	40	200	100	900	8,9
TUES	2	10000	10752	1	8,3
BEFS	6	5000	2000	1	7,8
HUT	80	400	512	1	7,2

отверстием и относительно высоким спектральным разрешением при сохранении эффективной площади на уровне, достигаемом в телескопе, имеющем вторичное зеркало. В схеме FUSE сегментирование апертуры начинается уже с питающей оптики, что увеличивает эффективную площадь благодаря применению различных покрытий для каждой пары телескопов. При этом удвоение спектрального разрешения обеспечивается не за счет увеличения габаритов конструкции (длина телескопа ORFEUS со спектрографом BEFS равна длине FUSE и составляет 4 м).

2. Особенности эксперимента “Спектр-УФ”

Напомним некоторые характеристики эксперимента, имеющие отношение к выбору схемы LSS.

2.1. Поиски схемы спектрографа с длинной щелью LSS

Требования к характеристикам СДЦ формировались как исходя из научных задач, так и с учетом ограничений, сформированных на этапе разработки приборного отсека, содержащего, кроме LSS, два спектрографа высокого разрешения, камеры поля и элементы системы точного сопровождения объекта. Следует реализовать следующие параметры LSS: размеры щели $0,082 \times 6$ мм ($1'' \times 75''$), спектральное разрешение $R = 2500$ (на $\lambda = 150$ нм), размеры рабочей поверхности ПИ 100×40 мм, размеры одного элемента ПИ 20×20 мкм. Предполагается регистрация спектров в двух поддиапазонах – дальнем УФ (FUV) $\lambda = 102\text{--}178$ нм и ближнем УФ (NUV) $\lambda = 178\text{--}300$ нм.

Первоначально рассматривалась двухканальная схема спектрографа, состоящая из двух сменных вогнутых роуландовских решеток. Основное преимущество схемы Роуланда – минимальное число оптических элементов, а следовательно, и мини-

мальные потери света, что оправдано в случае наблюдения предельно слабых объектов в диапазоне, где эффективность оптических покрытий относительно невелика и введение дополнительного оптического элемента приводит к ощутимым потерям света. То, что Роуландовская схема спектрографа содержит единственный элемент, является и недостатком, так как возможности исправления аберраций ограничены. Сферические вогнутые решетки обладают значительным астигматизмом 1-го порядка, и в обсуждаемой схеме изображение точечного источника на фокальной поверхности вытягивается почти на 5 мм, что сравнимо с изображением полной высоты входной щели. В этом случае обеспечивается хорошее спектральное разрешение при отсутствии требуемого пространственного разрешения. Применение тороидальной решетки с разными радиусами кривизны в сагиттальной и меридиональной плоскостях в значительной степени улучшает качество изображения, однако исправление астигматизма возможно только для двух точек. Расчеты показали, что данная схема спектрографа не обеспечивает не только пространственное, но и требуемое спектральное разрешение. Например, в канале FUV спектральное разрешение $R = 2500$ будет обеспечено только для небольшого спектрального интервала вблизи $\lambda = 160$ нм и не по всей высоте щели, а только для центральной ее части. В среднем для всего диапазона в канале FUV спектральное разрешение не превосходит 2000. Аналогичная картина наблюдается и для канала NUV. Единственным способом существенно улучшить качество изображения спектра в схеме спектрографа с одним элементом является использование вогнутых дифракционных решеток с переменной постоянной решетки или/и с криволинейным штрихом. Однако для нарезных решеток существуют технологические ограничения на закон изменения шага и кривизны штрихов. В 90-е годы в России была освоена технология изготовления “неклассических” вогнутых голографических дифракционных решеток, записанных с помощью асферических волновых фронтов. Подобные методы позволяют существенно уменьшить аберрации сферической вогнутой решетки.

Отметим недостаток рассматриваемого решения. Для эффективной работы в диапазонах FUV и NUV требуются различные типы фотокатодов и покрытий решеток. Проиллюстрируем это расчетом эффективной площади телескопа. Рабочая площадь главного зеркала телескопа космической обсерватории “Спектр-УФ” (Т-170М) с учетом центрального экранирования узлом вторичного зеркала составляет 2×10^4 см². При расчете коэффициента отражения от зеркал телескопа мы использовали данные для алюминиевого напыления, покрытого

слоем MgF_2 толщиной 25 нм. Для канала FUV использовалась кривая чувствительности фотокатода, покрытого солями CsI, для канала NUV – CsTe. На рис. 1 представлены зависимости эффективной площади LSS от длины волны в двухканальной и трехканальной (с сегментированной апертурой) схемах. Максимальная эффективность системы телескоп-спектрограф составляет около 10%, что соответствует эффективной площади около 2000 см², а на коротковолновом краю рабочего диапазона на $\lambda = 102$ нм эффективная площадь падает до 10 см², что объясняется низким коэффициентом отражения покрытий зеркал в этом диапазоне. На длинноволновом краю диапазона эффективность резко падает из-за снижения квантовой эффективности фотокатода. Эта оценка означает, что, кроме точного механизма смены решеток, необходимо предусмотреть установку двух ПИ, из которых в каждый момент наблюдений будет использоваться только один. В схеме Роуланда изображение спектра и входная щель находятся на одинаковом удалении от вогнутой дифракционной решетки. Применительно к схеме расположения LSS в приборном отсеке приемники излучения необходимо разместить вблизи фокальной поверхности телескопа, в верхней части приборного отсека, т. е. в объеме, предназначенном для камер поля и датчиков тонкой коррекции, что в значительной степени снижает жесткость и стабильность всего узла оптической скамьи телескопа Т-170М и приводит к полной переработке схемы фокальной плоскости телескопа.

Проблему компенсации аберраций и удобного размещения ПИ можно решить с помощью дополнительного оптического элемента. Этим элементом

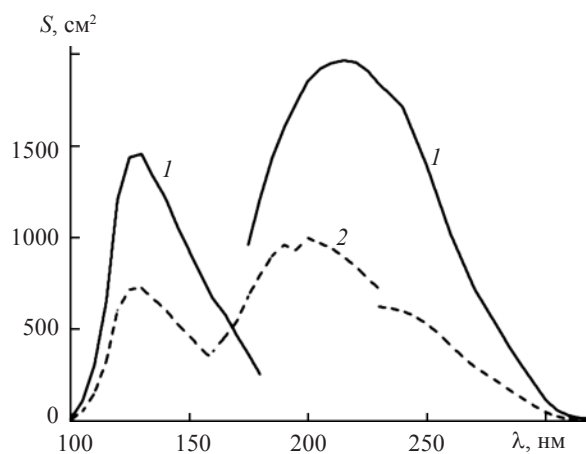


Рис. 1. Зависимости эффективной площади системы телескоп Т-170М-спектрограф LSS в двухканальной схеме спектрографа (1) и трехканальной схеме с сегментированной апертурой (2).

может быть вогнутое зеркало (коллиматор), установленное на месте вогнутой решетки. Зеркало может быть изготовлено в виде внеосевого парабооида или тороида. Вогнутая дифракционная решетка при этом устанавливается вблизи входной щели спектрографа и работает по схеме Водсворта. Понятно, что за повышение спектрального и пространственного разрешения, а также за перенос ПИ в нижнюю часть приборного отсека придется “заплатить” потерями света на дополнительном оптическом элементе.

Итак, к основным недостаткам двухканальной схемы LSS можно отнести следующие:

невозможность обеспечить требуемое спектральное разрешение по всему диапазону длин волн,

невозможность обеспечить достаточно высокую эффективность в пределах обоих спектральных поддиапазонов (FUV и NUV),

наличие сменных вогнутых дифракционных решеток, снижающих надежность работы спектрографа;

необходимость размещения ПИ в объеме, на который претендуют проектировщики камер поля.

Имеющиеся на данный момент предложения по усложнению оптической схемы LSS можно разбить на три группы:

а) схемы со сменными оптическими элементами (вогнутые решетки и отклоняющие плоские зеркала), обслуживающие ПИ с различными фотокатодами;

б) схемы с фиксированными элементами, использующие светоделители;

в) схемы, построенные при отказе от одного из требований к параметрам LSS (например, двухэлементная схема скрещенной дисперсии, работающая с двумя фотокатодами разного типа, расположенными рядом, и не обеспечивающая полного перекрытия всего спектрального диапазона).

Все эти предложения имеют существенные недостатки.

2.2. Сегментирование апертуры телескопа

Мы предлагаем схему с фиксированными оптическими элементами, в основу которой положено сегментирование апертуры телескопа. Преимущества схем сегментирования апертуры перед схемами, перечисленными в разделе 2.1, следующие:

а) каждый из сегментов работает в пучке, имеющем более низкое относительное отверстие, чем питающая оптика (это снижает aberrации решетки. Обычно для снижения aberrаций строят менее светосильную двухэлементную схему с коррекцией на одном или обоих элементах);

б) имеется возможность использования различных фотокатодов без применения дополнительных оптических элементов,

в) существует возможность построения схем, включающих использование перемещаемых оптических элементов;

г) часть апертуры может быть использована для спектроскопии, а часть, для фотометрии или для системы точного сопровождения объекта (гидирования).

Недостатком схемы сегментирования апертуры является принципиальная невозможность использования всей поверхности телескопа в каждом из спектральных диапазонов. Однако, как мы упоминали выше, показателем эффективности прибора является не только используемая площадь (апертуры). Проведем упрощенный анализ предлагаемой схемы.

Предположим, что во всем диапазоне используется фотокатод Cs_2Te (максимум квантовой эффективности $Q = 35\%$ на $\lambda = 200$ нм, с резкой коротковолновой границей у $\lambda = 120$ нм). Средняя квантовая эффективность фотокатода Cs_2Te в диапазоне NUV $Q = 23,5\%$, в диапазоне FUV – $Q = 6,2\%$. При несегментированной апертуре эффективная площадь в диапазоне FUV по сравнению с NUV снижается в 3,8 раза (в случае применения общего фотокатода). Теперь предположим, что во всем диапазоне используется фотокатод CsI ($Q_{\text{max}} = 27\%$ на $\lambda = 120$ нм, с длинноволновой границей у $\lambda = 200$ нм). Средняя квантовая эффективность фотокатода CsI в диапазоне NUV $Q = 7\%$, в диапазоне FUV – $Q = 24,2\%$. Итак, применение фотокатода CsI в диапазоне $\lambda = 160\text{--}300$ нм неэффективно, но в диапазоне $\lambda = 110\text{--}150$ нм этот фотокатод дает выигрыш в 3,9 раза по сравнению с фотокатодом CsTe . Если мы ставим задачу одновременной регистрации всего диапазона $\lambda = 100\text{--}300$ нм с близким отношением сигнал/шум, то сегментирование апертуры телескопа следует провести обратно пропорционально квантовой эффективности фотокатодов и оптических покрытий. Оценки пропускания телескопа выполнены нами для слоя $\text{Al} + \text{MgF}_2$ толщиной 25 нм (средний коэффициент отражения в диапазонах $\lambda = 160\text{--}300$ и $100\text{--}150$ нм составляет 0,83 и 0,64 соответственно). Получаем, что с учетом средней квантовой эффективности фотокатодов соотношение площадей коротковолнового и длинноволнового сегментов составит 1,26. В предлагаемой ниже схеме LSS длинноволновый сегмент содержит более одного элемента, поэтому данное соотношение необходимо корректировать в сторону увеличения площади длинноволнового сегмента. Для дальнейших оценок примем, что выполняется сегментирование апертуры на две равные площади. Таким образом, потери от предлагаемого решения составят 50% по эффективной площади в длинноволновом диапазоне, с принципиальной возможностью на-

блюдать в коротковолновом диапазоне (без резкого уменьшения эффективной площади в несколько раз). Заметим, что процедуру разделения коллиматора LSS на два сегмента можно сочетать с изменением фокусного расстояния этих частей, а также с введением третьего небольшого сегмента, который может являться единственным элементом системы контроля положения точечного объекта на входной щели (см., например, [5]). Такой контроль можно выполнять и в нулевом порядке дифракции.

3. Предлагаемая схема LSS

Рассмотрим теперь предлагаемую трехканальную схему LSS более детально (рис. 2). После прохождения щели SL расходящийся пучок делится на две части, причем разделение происходит по диаметру пучка, вдоль направления входной щели спектрографа. Одна часть пучка попадает на вогнутую решетку DG_1 , работающую в диапазоне $\lambda = 102\text{--}160$ нм. Вторая часть делится светоделителем BS на два канала: $\lambda = 160\text{--}230$ и $240\text{--}320$ нм. Среднее спектральное разрешение в каналах составляет соответственно $R = 2700, 2800$ и 3000 . Разрешение рассчитано для наблюдений протяженного объекта, в случае точечного объекта спектральное разрешение будет выше в 1,5–2 раза. Во всех расчетах учитывалась оптическая схема телескопа и, в частности, то обстоятельство, что щель спектрографа

LSS находится на расстоянии 50 мм от главной оптической оси телескопа.

Рассмотрим особенности каждого из каналов.

3.1. Канал $\lambda = 102\text{--}160$ нм

Половина расходящегося пучка от входной щели спектрографа перехватывается вогнутой дифракционной решеткой, строящей изображение спектра в диапазоне $\lambda = 102\text{--}160$ нм. Из-за низкой эффективности отражающих покрытий в данном диапазоне использование дополнительной оптической поверхности приведет к существенному снижению информативности. Поэтому предлагается использовать одноэлементную схему. Для решения проблемы размещения ПИ вблизи фокальной поверхности телескопа дифракционная решетка устанавливается дальше от входной щели и строит изображение спектра ближе, чем в схеме Роуланда. Известно, что при невыполнении условия Роуланда для вогнутой решетки резко возрастают aberrации. Скомпенсировать aberrации можно, если использовать голографическую решетку с переменным шагом и/или криволинейным штрихом. Подчеркнем, что эффективное относительное отверстие этой решетки вдвое ниже, чем относительное отверстие телескопа. Монохроматическое изображение входной щели в фокусе вогнутой решетки имеет ширину 65 мкм. При качестве изображения точечного источника 20 мкм и средней обратной линейной дисперсии в первом канале

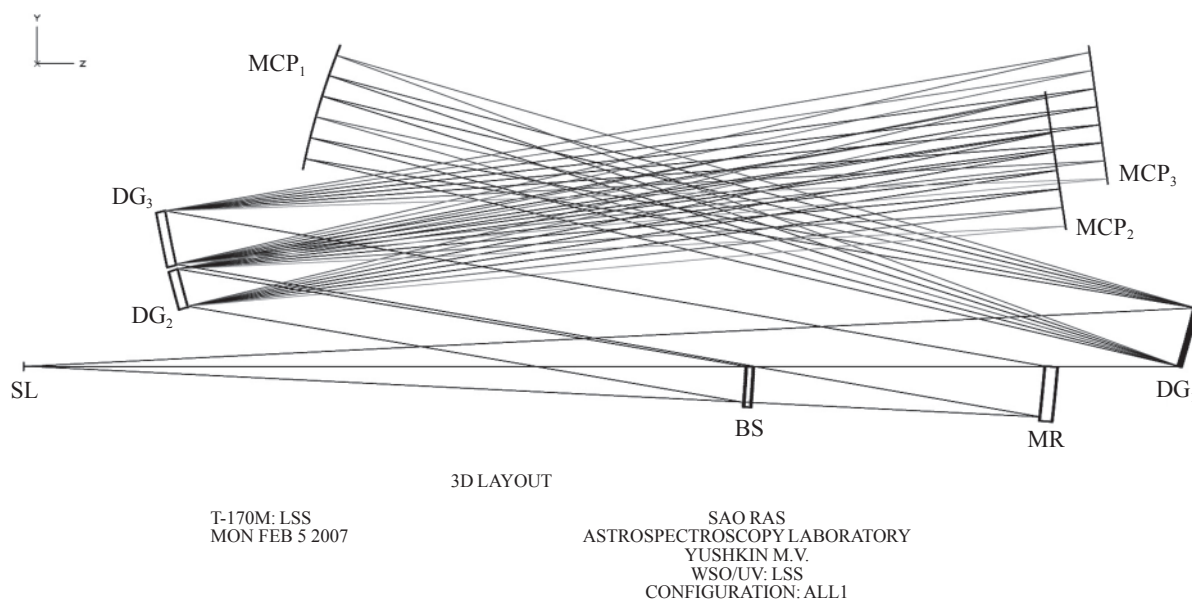


Рис. 2. Трехканальная схема LSS. Обозначения: SL – входная щель спектрографа, BS – светоделитель, выполненный в виде мениска, MR – вогнутое зеркало, DG и MCP – соответственно дифракционная решетка и приемник излучения, цифрами в индексах указаны номера каналов. Приемники излучения во втором и третьем каналах расположены один под другим вне главной плоскости спектрографа.

0,6 нм/мм среднее спектральное разрешение для протяженного источника составит $R = 2700$, а для точечного источника (с учетом диаметра астигматического пятна 30 мкм на входе в спектрограф) $R = 5000$.

3.2. Канал $\lambda = 160\text{--}230$ нм

Второй канал выделяется светоделителем BS, перехватывающим вторую половину апертуры пучка и установленным ближе к входной щели. Светоделитель выполнен в виде мениска, первая поверхность которого выполняет роль вогнутого зеркала, коллимирующего пучок света, отражаемый в диапазоне $\lambda = 160\text{--}230$ нм, тогда как более длинноволновое излучение проходит сквозь светоделитель. Отраженный от светоделителя параллельный пучок света попадает на вогнутую решетку DG₂, работающую по схеме Водсворта. Вогнутая решетка отражает свет обратно в направлении коллиматора и строит изображение спектра. Таким образом решается проблема установки второго ПИ (он расположен в нижней части объема спектрографа). Во втором канале масштаб изображения в фокусе вогнутой решетки равен масштабу на входе в спектрограф, поэтому монохроматическое изображение входной щели в фокусе решетки имеет ширину 83 мкм. Следовательно, среднее спектральное разрешение в этом канале составит $R = 2800$ для протяженного объекта и $R = 5500$ для точечного объекта. Для компенсации аберраций первая поверхность светоделителя и вогнутая дифракционная решетка второго канала должны иметь тороидальную форму.

3.3. Канал $\lambda = 230\text{--}320$ нм

Излучение в диапазоне $\lambda = 230\text{--}320$ нм, прошедшее через светоделитель, попадает на вогнутое зеркало MR, коллимирующее пучок света и перебрасывающее его на вогнутую дифракционную решетку DG₃ Водсворта. Вогнутая решетка отклоняет свет обратно в направлении коллиматора и строит изображение в том же месте, что и решетка, работающая во втором канале. В третьем канале, как и во втором, изображение щели проецируется на ПИ в масштабе 1:1, среднее спектральное разрешение при этом составит $R = 3000$ и $R = 6000$ для протяженного и точечного объектов соответственно.

Укажем варианты схемы второго и третьего каналов:

а) решетки второго и третьего каналов строят изображение спектра на одном приемнике, в этом случае две полоски спектра размещаются одна под другой и эффективно используется вся площадь ПИ 100×40 мм²;

Таблица 2. Параметры эффективности трехканальной схемы спектрографа LSS для случая спектроскопии протяженных источников. Эффективная площадь S приведена для центральных длин волн каналов

Каналы	S , см ²	R	N	M
LSS ₁	600	2700	1538	150
LSS ₂	1000	2800	1204	150
LSS ₃	295	3000	1204	150

б) решетки второго и третьего каналов строят изображение спектра на разных ПИ, расположенных рядом. В этом случае возможно оптимально подобрать тип фотокатода под более узкие спектральные поддиапазоны. Параметры трех каналов LSS приведены в табл. 2.

3.4. Эффективность трехканальной схемы LSS

Эффективность спектрографа можно оценивать в терминах потенциального качества [6]. Потенциальное качество спектрографа W можно выразить через произведение спектрального разрешения R , светосилы по потоку L , числа одновременно регистрируемых элементов спектра N , числа одновременно регистрируемых пространственных элементов M , квантовой эффективности приемника Q . Такой подход полезен как при сравнении разных оптических схем одного класса, так и при анализе спектральных приборов разного класса. Если какие-то параметры сравниваемых спектральных систем одинаковы (например, используются одинаковые ПИ), то можно сравнивать только часть переменных. Например, произведение RL в рамках данного дифракционного спектрографа является инвариантом: расширяя вдвое щель, в 2 раза теряем в спектральном разрешении и столько же выигрываем в светосиле по потоку. А произведение RLN уже не является инвариантом, так как при расширении щели теряем еще в 2 раза в числе одновременно регистрируемых элементов спектра N . В рамках данной работы произведение LQ можно приравнять эффективной площади S .

Оценим потенциальное качество для одноэлементной схемы (роуландовская решетка с одним приемником) – W^1 . Допустим, что аберрации исправлены идеально (и вдоль диапазона длин волн, и вдоль щели), тогда разрешение ограничивается ПИ. Максимальное число разрешаемых элементов спектра, которые можно расположить на длине единственного ПИ для протяженного объекта, составит $N = 1205$. Число разрешаемых пространственных элементов (вдоль щели длиной 75") составит $M = 150$, а спектральное разрешение $R = 2000$. Вместо светосилы по потоку L в выражение для потенциального качества спектрографа под-

ставим эффективную площадь $S = 1850 \text{ см}^2$. Тогда становится возможным сравнить между собой не только спектрографы, работающие на одном телескопе, но и эффективности различных экспериментов (см. табл. 1). В этом случае эффективность одноэлементной схемы спектрографа $W^I = RSNM = 6,75 \times 10^{11}$.

Оценим потенциальное качество в двухканальной схеме W^{II} (решетка со сменными приемниками на два поддиапазона). Если предположить, что все условия по спектральному и пространственному разрешению идентичны одноэлементной схеме, то различие в потенциальном качестве определяется только различиями в квантовой эффективности применяемых фотокатодов. Согласно приведенным выше оценкам основной выигрыш в потенциальном качестве (по сравнению с W^I) будет иметь место в коротковолновом диапазоне (в 4 раза). Если переход на другой ПИ выполняется путем ввода дополнительного оптического элемента, можно учесть и соответствующие потери в S .

Рассмотрим потенциальное качество предлагаемой трехканальной схемы с сегментированной апертурой – W^{III} .

Для коротковолнового канала $R = 2700, S = 600 \text{ см}^2$ (с учетом сегментирования апертуры), $N = 1538, M = 150, W_1^{III} = 3,74 \times 10^{11}$. Более подробно изменение эффективной площади телескопа с длиной волны в трехканальной схеме показано на рис. 1 (кривая 2), а здесь мы оцениваем эффективную площадь на центральной длине волны соответствующего поддиапазона.

Для канала $\lambda = 160\text{--}230 \text{ нм}$ $R = 2800, S = 1000 \text{ см}^2$ (с учетом сегментирования и дополнительных оптических элементов в канале), $N = 1205, M = 150, W_2^{III} = 5,06 \times 10^{11}$.

Для канала $\lambda = 230\text{--}320 \text{ нм}$ $R = 3000, S = 290 \text{ см}^2$, $N = 1205, M = 150$ и, соответственно, $W_3^{III} = 1,57 \times 10^{11}$.

Так как три канала работают одновременно, общее (суммарное) потенциальное качество составит $W^{III} = 1,037 \times 10^{12}$, что более чем в 1,5 раза превосходит потенциальное качество одноэлементной схемы. Подчеркнем, что, помимо выигрыша в потенциальном качестве, в трехканальной схеме нет переключаемых элементов, что значительно повышает надежность спектрографа.

Если оценивать потенциальное качество для случая наблюдения точечных объектов, то величину M следует убрать, а в величины спектрального разрешения R следует подставить более высокие значения. Относительный выигрыш схемы с сегментированной апертурой при этом только возрастет.

Предложенная схема сегментирования апертуры спектрографа с длинной щелью LSS для космической обсерватории “Спектр-УФ” имеет только один недо-

статок – двукратную потерю света по сравнению с одноэлементной схемой. Этот недостаток компенсируется тем, что в одноэлементной схеме невозможно наблюдать сразу весь требуемый диапазон, а для наблюдения в соседних поддиапазонах все равно потребуется затратить дополнительное время телескопа. Таким образом, преимущество одноэлементной схемы в светосиле по потоку проявится только в тех случаях, когда научная задача требует наблюдений лишь в одном выбранном поддиапазоне.

Выводы

Предложена эффективная схема спектрографа с длинной щелью LSS для космической обсерватории “Спектр-УФ”, основанная на принципе сегментирования апертуры.

Основные достоинства схемы по сравнению с другими, ранее предлагавшимися схемами:

а) повышается надежность спектрографа (нет подвижных элементов, а в случае отказа одного из приемников излучения спектрограф продолжит работу с другим);

б) конструкция спектрографа не конфликтует с уже проработанными решениями оптического стола в фокальной поверхности телескопа и схемами соседствующих спектрографов высокого разрешения;

в) повышается качество спектра (за счет снижения эффективного относительного отверстия каждого из каналов и за счет оптимизации каждого из каналов);

г) количество информации, регистрируемой в единицу времени, возрастает более чем вдвое (в отдельных поддиапазонах – в несколько раз).

Авторы благодарны Р.Е. Гершбергу и В.Ю. Теребижу за полезные обсуждения проблемы одноэлементных спектрографов. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 07-02-00247-а) и Фонда содействия отечественной науке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ультрафиолетовая Вселенная / Под ред. Б.М. Шустова, Д.З. Вибе. ГЕОС, 2000.
2. Bowyer S., Drake J.J., Vennes S. Extreme Ultraviolet Astronomy // Ann. Rev. Astron. & Astrophys. 2000. V. 38 P. 231–288.
3. Fundamental Questions in Astrophysics: Guidelines for Future UV Observations / Eds. A.I. Gomez de Castro, W. Wamsteker. Springer, 2006. 170 p.
4. Панчук В.Е., Шустов Б.М., Юшкин М.В. Ультрафиолетовая спектроскопия астрофизических объектов // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 4. С. 49–59.
5. Панчук В.Е., Юшкин М.В. Анализ точностных характеристик спектроскопических наблюдений // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 4. С. 60–64.
6. Миберн Дж. Обнаружение и спектрометрия слабых источников света. М.: Мир, 1979. 304 с.