

СОВРЕМЕННЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ ДЛЯ  
СОВРЕМЕННЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ СПЕКТРОМЕТРОВ

Э. А. Яковлев\*, И. Ф. Бикмаев, В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук

*Дана ретроспектива использования дифракционных решеток на БТА, охарактеризовано современное состояние и предложены некоторые перспективные варианты.*

*The retrospective of the using on the 6-m telescope of the diffraction gratings is presented, the modern statement is characterized and some perspective variants are proposed.*

Анализ результатов распределения времени работы 6-м телескопа по типам используемой аппаратуры показывает, что с 1977 г. по настоящее время подавляющее число наблюдений выполняется с применением щелевых дифракционных спектрографов. В кабине первичного фокуса использовались сменные спектрографы UAGS (Гутке, 1969) и СП-160 (Зандин и др., 1977а) с диаметрами коллимированного пучка 75 и 100 мм соответственно. В фокусе Нэсмита-1 использовались сменные спектрографы СП-161 (Зандин и др., 1977б) и СП-124 (Гусев и др., 1976) с диаметрами коллимированного пучка 130 и 80 мм, соответственно. В фокусе Нэсмита-2 стационарно размещен Основной звездный спектрограф ОЗСП (Васильев и др. 1977) с диаметром коллимированного пучка 260 мм. Ряд моментов, отражающих основные этапы разработки, внедрения, эксплуатации и развития перечисленных приборов, можно найти в работах Глаголевского и др. (1975), Копылова и Рылова (1979), Войханской и Рылова (1979), Афанасьева и Пимонова (1981), Штоля и др. (1985), Бикмаева и Панчука (1986), Бикмаева и др. (1986), Гажура и др. (1986), Гажура и др. (1990), Бикмаева и Гажура (1990), Афанасьева и др. (1990), Клочковой и Панчука (1991а, б). Здесь мы не останавливаемся на вопросах использования дифракционных решеток, работающих в низких порядках в спектрографах с малым (<100 мм) значением диаметра коллимированного пучка, так как технология изготовления таких решеток достаточно развита, а применение таких решеток на БТА неперспективно (Панчук, 1987). Исключения составляют методы многообъектной спектроскопии, где перспективным является использование прозрачных дифракционных решеток небольших размеров (Афанасьев, 1990). Основное внимание уделим спектрографам, развитие которых требует значительных усилий в области технологии изготовления дифракционных решеток.

\* ГОИ им. Вавилова

## Классические дифракционные решетки

Первый этап развития спектральных возможностей как БТА, так и других крупных телескопов Союза, характеризуется тем, что внедрение новых типов светоприемников осуществлялось на спектрографах с малым диаметром коллимированного пучка (в случае БТА: UAGS, СП-160, СП-124). Естественно, что затраты на оснащение крупногабаритными высокоэффективными решетками спектрографов, ориентированных на фотографическую регистрацию спектров, не сулили существенного выигрыша в проникающей способности этих спектрографов и не признавались в качестве наиболее приоритетных. Отсутствие спроса на крупногабаритные дифракционные решетки определялось еще и появлением телескопов, лишенных спектрографов Кудэ (2.6-м в Армении, 1-м в Таджикистане и Узбекистане).

ОЗСП БТА был оснащен вначале двумя решетками 600 штр/мм с углами блеска  $17^{\circ}30'$  и  $29^{\circ}30'$ , работающими с камерами Шмидта и с длиннофокусной камерой №1, соответственно. Затем комплект решеток был расширен ( $8^{\circ}30'$ ,  $12^{\circ}40'$ ,  $25^{\circ}10'$ ), а диспергирующий узел камеры №1 реконструирован (Гажур и др., 1986), что позволило существенно расширить возможности спектрографа, ориентируя каждый наблюдательный вариант на максимум концентрации рабочего спектрального порядка соответствующей решетки (Бикмаев и др., 1986). Все упомянутые решетки были нарезаны на делительной машине Государственного Оптического Института. За 12 лет работы с этими решетками на ОЗСП по научным программам советских и зарубежных астрономов получено свыше 5 тысяч спектрограмм, при этом было выполнено два спектральных обзора (Клочкова и Копылов, 1986; Глаголевский и др., 1986), непревзойденных пока по объему и качеству.

В начале 70-х годов технологически доступным являлся размер заштрихованной части решеток 200x300 мм, что не обеспечивало полного использования коллимированного пучка ОЗСП, представляющего собой в проекции на плоскость решетки эллипс с диаметрами 340 и 260 мм. Для разных углов блеска и разных рабочих углов это приводит к потерям света от 10 до 25%. Реализация новых возможностей технологии изготовления дифракционных решеток, в частности, возможностей создания решеток с размерами заштрихованной поверхности до 500x400 мм, позволила приступить ко второму этапу повышения эффективности ОЗСП БТА. Предполагается оснастить спектрограф комплектом из 5 решеток (реплик) с размерами заштрихованной поверхности 360x300 мм (600 штр/мм) и углами блеска от  $8^{\circ}$  до  $31^{\circ}$ . За счет полного использования коллимированного пучка, физического обновления комплекта, эксплуатируемого свыше 10 лет, и улучшенной структуры штриха реплики по сравнению с матрицей (Герасимов и Яковлев, 1982) эффективность спектрографа по световому потоку увеличится на 20-30%. Безусловно, замена имеет смысл, если степень концентрации света в рабочих порядках окажется не ниже, чем у используемых решеток. Испытания первых крупногабаритных решеток показали, что в рабочих порядках с наибольшей концентрацией света (до 70%) световая эффективность новых решеток превосходит характеристики используемого комплекта.

В ряде случаев на длиннофокусной камере ОЗСП в качестве светоприемника использовались матрица приборов с зарядовой связью (ПЗС) или двумерный счетчик фотонов. В дальнейшем предполагается более полное использование достоинств ОЗСП в сочетании с новыми светоприемниками (Клочкова и Панчук, 1991а), для чего необходимо понизить уровень рассеянного света. Использование делительных машин с ин-

терференционным управлением, имеющих ряд преимуществ перед механическими делительными машинами (Герасимов и Яковлев, 1982), приводит к понижению уровня рассеянного света, в частности, интенсивность духов Роуланда снижается в сотни раз.

В отличие от спектрографов фокуса Кудэ, ОЗСП БТА размещен в объеме одной из опор горизонтальной оси БТА, где по ряду причин наблюдаются значительные вариации температуры (Бикмаев и Панчук, 1986). Поэтому для указанного набора дифракционных решеток отлиты заготовки из ситалла (Лыткаринский завод оптического стекла). При этом заодно обойдены и трудности, определяемые пузырьностью стекол марок ЛК, существенные при полировке крупногабаритных заготовок. При этом на указанных размерах реализованы: общая ошибка -  $N_A=1-2$  полосы, местная ошибка -  $\Delta N_A=0.2-0.3$  полосы, класс чистоты для заготовок под матрицы - I-II, класс чистоты для заготовок под реплики - III-IV.

В эпоху, когда крупные телескопы оснащаются системами кудэ-эшелле, реализуемая программа изготовления крупных решеток, работающих в низких порядках, может показаться несколько архаичной. Поэтому перечислим ситуации, где использование таких решеток принципиально. Во-первых, это все виды спектральных наблюдений, где принципиально использование двумерных счетчиков фотонов (сверхскоростная спектроскопия, наблюдения в УФ-диапазоне, где квантовая эффективность фотокатода сравнима с эффективностью матрицы ПЗС, спектроскопия сверхслабых объектов). Во-вторых, наблюдения в низких спектральных порядках необходимы еще и потому, что работа в высоких спектральных порядках, где концентрация света в пределах одного порядка изменяется достаточно круто, ограничивает применение счетчиков фотонов из-за их небольшого (по сравнению с матрицами ПЗС) динамического диапазона. В-третьих, системы счета фотонов имеют принципиальную возможность вариации значения обратной линейной дисперсии за счет масштаба оптического переброса изображения с люминофора ЭОПа на телевизионную мишень. В-четвертых, плотная компоновка спектральных порядков в формате эшелле исключает возможность применения резателей изображения. В-пятых, по этой же причине на большинстве эшелле-систем невозможна одновременная регистрация спектра фона неба (эшелле-спектр фона неба должен быть вложен между порядками спектра объекта). И, наконец, работа с зеемановскими анализаторами спектра также трудно совместима с форматом эшелле.

Перспективной является технология нанесения решеток на асферическую поверхность. Для изготовления таких решеток разработан метод эластической релаксации, что позволило создать экономичный спектрограф первичного фокуса (Леметр, 1981).

#### Решетки эшелле

Метод эшелле-спектроскопии испытал второе рождение в результате развития цифровых методов регистрации изображений. На БТА стационарно установлен реконструированный эшелле-спектрометр СП-161, оснащенный двумерной системой счета фотонов (Гажур и др., 1990; Ключкова, Панчук, 1991б). От попыток дооснастить спектрометр решеткой эшелле с классическим значением угла блеска ( $63.5^\circ$ ) мы отказались из-за конструктивных трудностей. На делительной машине ГОИ была нарезана решетка эшелле (75 штр/мм, угол блеска  $63.5^\circ$ , размер заштрихованной площади  $200 \times 300$  мм), с которой сделана реплика. Данная реплика использована вначале при лабораторном макетировании эшелле-спектрографов различных схем, а затем послужила основой автоколлимационного эшелле-спектрометра ЭСПАК, используемого в наблюдениях на БТА

как с двумерной системой счета фотонов, так и с матрицей ПЗС (Клочкова и др., 1991). В данной схеме решетка ориентирована так, что самозатенение штрихов отсутствует. Перспективность такой конструкции конкретизована нашими планами создания большого автоколлимационного эшелле-спектрометра с диаметром коллимированного пучка до 300 мм (Клочкова и Панчук, 1991а). Ясно, что в этой схеме невозможно обойтись без мозаичной эшелле, составленной из двух идентичных реплик, выполненных на матрице размером 320×320 мм (37.5 штр/мм, угол блеска 63.5°). К настоящему времени изготовлена и испытана камера спектрометра (Ленинградское оптико-механическое объединение), изготовлена матрица эшелле, изготовлены и испытаны реплики эшелле и ведутся работы по узлу скрещенной дисперсии. Итак, невозможность развернуть на альт-азимутальной системе классическую схему эшелле с рекордным значением диаметра коллимированного пучка мы надеемся компенсировать экономичной автоколлимационной системой, где потери на двукратное прохождение через камеру компенсируются отсутствием самозатенения штрихов. Увеличение диаметра коллимированного пучка - традиционный путь увеличения разрешающей способности при заданной светосиле.

Вторым направлением использования решеток эшелле мы считаем совершенствование систем с достаточно скромным (для БТА) диаметром коллимированного пучка (не более 100 мм). С этой целью разрабатывается схема светосильного эшелле-спектрометра, ориентированного на использование решетки 75 штр/мм с углом блеска 63.5°. Параметры спектра, регистрируемого на матрицу ПЗС с камерой  $F=175$  мм (1:1.7), близки к наиболее популярным значениям обратных дисперсий, реализуемых на ОЗСП с камерой Шмидта  $F=600$  мм. Эта схема эшелле-спектрометра предназначается также и для экспериментальных работ, в частности, для проверки идеи использования иммерсионной дифракционной решетки (Деккер, 1987). Итак, второй возможностью увеличения разрешающей способности при данной светосиле является помещение эшелле решетки довольно скромных размеров в среду с высоким показателем преломления. Как и в первом случае, требования к понижению уровня рассеянного света неизбежно следуют из необходимости тесной упаковки спектральных порядков (в соседних порядках могут оказаться спектральные детали, существенно различающиеся по интенсивности).

Третьим направлением использования эшелле может оказаться сочетание эшелле-спектрометра с эталоном Фабри-Перо. В этом случае нам необходимы эшелле небольших размеров с тем, чтобы коллимированный пучок вписался в диаметр пластин эталона (около 40 мм). В отличие от схемы с качающимся эталоном (Бэйтс и др., 1978) следует применить схему со сканированием спектра за счет изменения давления воздуха между пластинами эталона. Согласование разрешающей способности и скважности эталона с величиной обратной линейной дисперсии в ряде случаев может потребовать изготовления небольшой эшелле с углом блеска, превышающим классический (63.5°).

Для телескопов среднего диаметра на экваториальной монтировке перспективной остается схема кудэ-эшелле. С учетом достижений технологии изготовления больших решеток эшелле для 1-м телескопа СА0 разработаны варианты такой схемы (Домбровская и Парицкая, 1990).

#### Выводы

Для развития возможностей БТА в области спектроскопии высокого разрешения

считаем перспективным:

1. Оснащение ОЗСП БТА комплектом реплик, перекрывающих коллимированный пучок, с широким набором углов блеска.
2. Изготовление большой решетки эшелле, состоящей из двух идентичных реплик.
3. Изготовление небольшой эшелле с рекордными значениями угла блеска.
4. Экспериментальную работу по сочетанию эшелле с иммерсионными средами.
5. Экспериментальную работу по созданию решеток, нанесенных на асферическую поверхность.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Афанасьев В.Л. : 1990, Структура и эволюция активных галактик. Автореф. докт. дисс., Бюракан.
- Афанасьев В.Л., Липовецкий В.А., Михайлов В.П., Назаров Е.А., Шаповалова А.И. : 1990, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 31, 128.
- Афанасьев В.Л., Пимонов А.А. : 1981, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 13, 76.
- Бикмаев И.Ф., Гажур Э.Б. : 1990, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 32, 181.
- Бикмаев И.Ф., Ключкова В.Г., Панчук В.Е. : 1986, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 23, 118.
- Бикмаев И.Ф., Панчук В.Е. : 1986, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 23, 112.
- Бэйтс и др. (Bates V., Byrne F.N., Giaretta D.L., McCartney D.J., McQuoid A.J.) : 1978, in: High resolution spectrometry. Proc. of the 4th Coll. on ASTROPHYSICS, Trieste, July 3-7, 420.
- Васильев А.С., Евзеров А.М., Лобачев М.В., Пейсахсон И.В. : 1977, Оптико-механ. пром., 2, 31.
- Войханская Н.Ф., Рылов В.С. : 1979, В сб. : Новая техника в астрономии, Л. : Наука, 6, 31.
- Гажур Э.Б., Найденов И.Д., Панчук В.Е., Перепелицын Е.И. : 1986, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 23, 105.
- Гажур Э.Б., Ключкова В.Г., Панчук В.Е. : 1990, Письма в астрон. ж., 16, 473.
- Герасимов Ф.М., Яковлев Э.А. : 1982, В кн. : Современные тенденции в технике спектроскопии, Наука, Новосибирск, 24.
- Глаголевский Ю.В., Рылов В.С., Шеглов П.В., Чунтонов Г.А. : 1975, В сб. : Новая техника в астрономии, Л. : Наука, 5, 7.
- Глаголевский и др. (Glagolevsky Yu.V., Klochkova V.G., Kopylov I.M.) : 1986, in: Upper Main Sequence Stars with Anomalous Abundances, IAU Coll. No.90, eds.: Cowley C.R., Dworetzky M.M., Megessier C., 29.
- Гусев О.Н., Зандин Н.Г., Лобачев М.В. : 1976, Оптико-механич. пром., 12, 63.
- Гутке Д. : 1969, Йенское обозрение, ярмарочный выпуск, 101.
- Деккер (Decker H.) : 1987, ESO, Sci. Prepr., N 559.
- Домбровская А.Б., Парицкая Г.Г. : 1990, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 32, 191.
- Зандин Н.Г., Колесников А.Е., Пейсахсон И.В., Лобачев М.В. : 1977, Оптико-механ. пром., 2, 34.
- Зандин Н.Г., Гусев О.Н., Пейсахсон И.В. : 1977, Оптико-механич. пром., 6, 20.
- Ключкова и Копылов (Klochkova V.G., Kopylov I.M.) : 1986, in: Upper Main Sequence Stars with Anomalous Abundances, IAU Coll. No.90, eds.: Cowley C. R., Dworetzky M.M., Megessier C., 159.

- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1991а, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 33, 3.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1991б, Препринт САО, № 70.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Рядченко В. П.: 1991, Письма в астрон. ж., 17, 644.
- Копылов И. М., Рылов В. С.: 1979, В сб.: Новая техника в астрономии, Л.: Наука, 6, 24.
- Леметр (Lemaitre G.): 1981, in: Instrumentation for astronomy with large optical telescopes, IAU Coll. No. 67, Zelenchukskaya, 1981, 137.
- Панчук В. Е.: 1987, Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв., 56, 25.
- Штоль В. Г., Бычков В. Д., Викульев Н. А., Георгиев О. Ю., Глаголевский Ю. В., Драбек С. В., Найденов И. Д., Романюк И. И.: 1985, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 19, 66.

Поступила в редакцию  
16 ноября 1990 г.