

## О ПОЛЬЗЕ НЕКЛАССИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ АСТРОНОМИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

Панчук В.Е., Сачков М.Е., Якопов М.В.

Институт астрономии РАН

**РЕЗЮМЕ.** Рассмотрены некоторые пути повышения эффективности астрономической спектроскопии высокого разрешения на крупных оптических телескопах.

### 1. Три способа модуляции спектра

В классическом спектрографе детектируемый сигнал пропорционален интенсивности света в данном интервале длин волн. В призменных и дифракционных спектрографах калибровка шкалы длин волн осуществляется в отдельных точках, соответствующих положению линий спектра сравнения. Принцип действия таких приборов аналогичен способу амплитудной модуляции в радиоэлектронике.

Частота колебаний сигнала на выходе Фурье-спектрометра обратно пропорциональна длине волны. Метод спектроскопии, основанный на преобразовании Фурье, аналогичен способу частотной модуляции в радиоэлектронике. Запаздывание внедрения метода определялось его зависимостью от развития цифровых вычислительных средств, (тогда как в классических спектрографах долгое время достаточным было аналоговое представление сигнала, – например, фотографирование спектра). Поэтому спектрометрия с преобразованием Фурье считалась «весьма трудоемким *кованным* методом изучения спектров» (Mertz, 1965).

Если излучение объекта искусственно поляризовать по известному закону, то появляется возможность использовать поляриметрическую калибровку по длинам волн, что аналогично способу фазовой модуляции в радиоэлектронике. При поляриметрической калибровке спектра фаза синусоидальной модуляции интенсивности сигнала на выходе – обратно пропорциональна длине волны искусственно поляризованного света.

В эпоху одноканальных приемников лидеры практической астрофизики иногда использовали Фурье-спектрометры и даже поляризационные спектрометры (Serkowski, 1972). Внедрение многоканальных приемников породило мнение, что о мультиплексных методах можно забыть. Сегодня, когда технические ресурсы дифракционных спектрографов представляются нам «выработанными», нелишне вспомнить некоторые моменты истории спектроскопии с одноканальными приемниками.

### 2. Пределы дифракционной спектроскопии

Несмотря на то, что в Фурье- и поляризационных спектрометрах калибровка по длинам волн

осуществляется для каждой точки спектра, в астрономической спектроскопии по-прежнему популярен первый из трех способов модуляции – т.е. представление сигнала в форме «интенсивность в функции длины волны (частоты)». Этот консерватизм в известной мере обусловлен относительной доступностью и традициями изготовления спектральной аппаратуры, а также наглядностью соответствующих методов спектрального анализа. Определенную роль сыграло и то обстоятельство, что классический спектрограф позволил выявить структуру энергетических уровней атомов и молекул раньше, чем это было сделано при помощи интерференционных методов. Впоследствии интерферометрические методы сыграли основную роль в лабораторной атомной спектроскопии, когда потребовалось измерять положения спектральных линий с высокой точностью и(или) со спектральным разрешением, недоступными для дифракционных спектрографов.

В астрономической спектроскопии преимущество интерферометров перед дифракционными спектрографами (выигрыш Жакино), в значительной мере скомпенсировано (Panchuk et al., 2007), достижениями технологии изготовления дифракционных решеток с большой заштрихованной площадью. Для крупнейших телескопов построены десятки спектрографов высокого разрешения, но один из основных параметров этих приборов – геометрическая светосила  $L=A\omega$  – уже близок к пределу. (Здесь  $A$  – площадь зрочка системы, заполняемая под телесным углом  $\omega$ ). Например, у двух самых крупных эшелельных спектрографов высокого разрешения (HIRES Keck и HDS Subaru), диаметр коллимированного пучка  $d=30$  см, у НЭС БТА –  $d=24$  см, еще около десятка приборов имеют  $d=20$  см. Увеличение  $d$  позволяет пропорционально уменьшить угол  $\omega$ , минимальное значение последнего ограничивается состоянием атмосферы и качеством оптики телескопа. Спектроскопия высокого разрешения на больших телескопах является случаем, когда диаметр изображения звезды  $\beta$  больше ширины щели  $\omega$ . Поэтому выигрыш в проницающей способности наблюдений пропорционален не квадрату, а первой степени диаметра  $D$  зрочка телескопа. Следовательно, необходимо искать методы, альтернативные увеличению  $D$ . Перспективным является сочетание дифракционного спектрографа с адаптивной оптикой телескопа, (см., например, Ge et al., 2002), но этот подход не является достижением собственно спектроскопии.

### 3. Дифракционные приборы с фильтрацией пространственных частот

В радиотехнике известно, что для получения максимальной величины отношения сигнал/шум следует проводить оптимальную согласованную фильтрацию сигнала, причем до устройства, принимающего решение о наличии или отсутствии сигнала. В оптическом диапазоне согласованная фильтрация временных частот сигнала невозможна, и заменяется фильтрацией частот модуляции сигнала. В одноканальном сканирующем спектрометре реализован простейший случай фильтрации частот амплитудной модуляции (на выходную щель последовательно проецируются соседние участки спектра). Для увеличения светосилы метода можно применять системы входных и выходных щелей (или более сложные двумерные конфигурации, т.н. растры), т.о. дополнительно к фильтрации частоты модуляции используется фильтрация пространственных частот в изображении. В растровом спектрометре модулируется та длина волны, для которой в данный момент времени изображение входного раstra в точности совпадает с выходным растром. Требование идеального совпадения изображения входного раstra с выходным растром ограничивают интервал сканирования длин волн. Интервал сканирования может быть увеличен в несколько раз за счет выбора закона модуляции (см., например, Горский и др., 1970). Широкая составляющая аппаратной функции прибора с растром функционального типа ограничивала применение приемников, шумы которых зависели от уровня сигнала. Были предложены различные методы учета (устранения) паразитной засветки приемника, технически простым оказался метод модуляции потока излучения путем периодического перемещения входного раstra на величину, определяемую наиболее узким элементом раstra. В астрофизике спектрометры с растрами Жирара применялись преимущественно в инфракрасном диапазоне, где шумы приемника не зависели от уровня сигнала. Принцип двойного мультиплексирования (на входе и на выходе спектрометра) позволяет реализовать выигрыш Фелжета и, одновременно, приблизить светосилу дифракционного спектрометра к таковой для интерференционного. Было показано (Harwit et al., 1970), что, по светосиле и шумовым характеристикам, схема двойного мультиплексирования с бинарным циклическим кодированием, – приближается к интерферометру Майкельсона. Однако технически спектрометр с кодирующими масками (например, строками матрицы Адамара), изготовить и эксплуатировать гораздо проще, чем сканирующий интерферометрический прибор. Спектрометры с преобразованием Адамара применялись в бортовых астрофизических экспериментах. Метод кодирования спектра был распространен и на панорамную спектроскопию, путем кодирования изображений (Harwit, 1971; 1973). Главный недостаток растровой спектроскопии состоит в высоких требованиях к

качеству изображения спектра и к неизменности этого изображения при сканировании спектра. Эта проблема, как и проблема изготовления мелких растров, может быть решена, если в качестве растров использовать кольца интерференции (Girard, 1960), в работе (Тарасов & Гуд, 1974) для этой цели использовались эталоны Фабри-Перо. Применение интерференционных растров позволит увеличить разрешение и светосилу (последнее из-за того, что в качестве коллиматора и объектива могут использоваться светосильные объективы). Применение многоэлементных приемников, шумы которых не зависят от уровня сигнала, открывает новые возможности для схем с фильтрацией пространственных частот. На больших телескопах, где диаметр турбулентного диска звезды намного превосходит ширину щели спектрографа высокого разрешения, применение кодирующих масок может обеспечить многократный выигрыш в светосиле.

### 4. Интегральные характеристики спектра

Спектр звезды обладает характеристиками двух типов. Первый тип относится преимущественно к свойствам атомов, ионов и молекул – это число и интенсивность линий различных химических элементов. Второй тип характеризует макроскопические свойства среды, в которой эти элементы находятся – это температура, плотность, и различные формы движения: осевое вращение, турбулентность, радиальные и нерадиальные пульсации, перемещение звезды в пространстве. В оптическом диапазоне спектр атмосферы холодной звезды представлен преимущественно линиями элементов железного пика, так что различия во влиянии атомного веса на параметры теплового уширения «среднестатистической» линии незначительны. Измерение макроскопических свойств среды при классическом способе модуляции – интенсивность в функции длины волны – является трудоемкой процедурой. В спектрограмме необходимо измерить характеристики (положения, форму профилей, полуширины, асимметрию) большого числа линий, чтобы затем определить средние (для большинства линий) характеристики. Например, с целью точного определения средней лучевой скорости необходимо измерить положения 200-300 линий. При этом для измерения фотографических спектров иногда применялись осциллоскопические компараторы (Антропов, 1972), т.е. положения отдельных линий измерялись методом автокорреляции. Таким образом, по фрагменту спектра выполнялось необходимое функциональное преобразование. Этот же метод может быть применен непосредственно при наблюдениях, без регистрации собственно спектра или его фрагментов. Так, если в спектрографе в фокальной плоскости установить щель, а изображение спектра перемещать поперек щели, то фотоэлектрический приемник зарегистрирует корреляционную функцию, положение и ширина которой охарактеризуют спектральную линию, находящуюся вблизи щели. Светосилу метода можно увеличить, установив систему щелей, положения которых

согласованы с положением спектральных линий. Метод фотоэлектрического корреляционного измерения лучевых скоростей, обоснованный в (Fellgett, 1955) и впервые реализованный в (Griffin, 1967), явился первым примером создания анализатора, осуществляющего представление излучения в виде удобного функционала, параметры которого содержат искомые характеристики спектра. Этот подход, когда необходимое интегральное преобразование осуществляется непосредственно в схеме прибора, оказался достаточно эффективным в эпоху одноканальных приемников и маломощных вычислителей. В настоящее время, когда корреляционная функция может быть вычислена непосредственно по спектру, зарегистрированному многоканальным приемником, преобладает точка зрения, что естественный путь определения интегральных характеристик – это вычисление их по классическому спектру.

В фотоэлектрическом измерителе лучевых скоростей, операция разложения излучения в спектр все же выполняется, и выигрыш состоит только в реализации принципа многоканальной спектроскопии на одноканальном приемнике, обладающим относительно высоким квантовым выходом, но имеющим шум «неудобной» природы. В Фурье-спектрометре выигрыш Фелжета реализуется только при использовании приемника с шумами тепловой природы, а при использовании приемника с шумами квантовой природы – не реализуется вообще. Показано (Лебедев, 1978), что если построить гипотетический специализированный прибор, в котором операция определения первого момента контура линии выполняется автоматически, в реальном времени, то вместо выигрыша Фелжета ( $N^{1/2}$  для теплового приемника), будет реализован более высокий выигрыш ( $N$  для теплового и  $N^{1/2}$  для фотонного приемников). Таким образом, интегральный способ измерения обобщенных характеристик спектров оказывается эффективнее классического, спектрального способа. Внимание привлекли оптические схемы, осуществляющие интегральное преобразование спектра, без разложения спектра по длинам волн.

### 5. Интерферометры

Основным способом представления случайных процессов, помимо функций распределения, является описание при помощи средних и моментов. Существует и другой подход – описание случайных величин и процессов с помощью кумулянтов (семиинвариантов) и кумулянтных функций. Преимущества такого описания отмечены в (Малахов, 1978). Проводя аналогию между контуром спектральной линии и статистической функцией распределения, авторы (Кожеватов и др., 1995) показали, что кумулянты (семиинварианты) спектрального распределения можно получить в интерферометре Майкельсона, реализующем как выигрыш Фелжета, так и выигрыш Жакино. В (Кожеватов и др., 1995) также отмечено, что чувствительность интерферограммы к семиинвариантам разных номеров зависит от разности хода интерферирующих лучей. Поэтому для оптимального измерения избранных семиинвариантов было предложено

применять интерферометрические схемы с различной разностью хода. Метод был реализован при наблюдениях лучевых скоростей на поверхности Солнца (Дидковский и др., 1986), затем для измерения четырех семиинвариантов, (три из которых идентичны первым трем центральным моментам), были использованы два интерферометра Майкельсона, с оптимально подобранной разностью хода (Кожеватов, 1983). Сочетание классических интерференционных схем с многоэлементными приемниками позволяет обойти проблему точного перемещения оптических элементов, примеры соответствующих решений приведены в (Panchuk et al., 2007). Измерения пространственно фиксированной интерферограммы позволяет определить интегральные характеристики спектра в приборе, не имеющем перемещаемых элементов.

### 6. Выводы

Звездная спектроскопия становится все более массовой, в смысле статистики объектов. Астрономы уже оперируют тысячами измерений лучевых скоростей, очередь за массовыми измерениями турбулентных характеристик и других движений в атмосферах. Здесь могут сыграть свою роль как методы кодировки изображений, так и интегральные методы, причем последние не сводятся только к двухлучевым интерферометрам.

### Литература

- L.Mertz: 1965, *Transformations in Optics*. J.Wiley & Sons, Inc. NY. (Русск. перевод: Мерц Л.: 1969, *Интегральные преобразования в оптике*, М.: Мир, 181с.).  
 K.Serkowski: 1972, *PASP*, **84**, 649.  
 V.E.Panchuk, V.G.Klochkova, D.S.Nasonov: 2007, *Odessa Astron. Publ.*, **20**, 103.  
 J.Ge, J.R.P.Angel, B.Jacobsen, N.Woolf, R.Q.Fugate, J.H.Black, M.Lloyd-Hart: 2002, *PASP*, **114**, 879.  
 С.М.Горский, В.А.Зверев, Г.К.Иванова: 1970, *Новая техника в астрономии*, **3**, 67.  
 M.Harwit, P.G.Phillips, T.Fine, N.J.A.Sloane: 1970, *Appl. Opt.*, **9**, 1149.  
 M.Harwit: 1971, *Appl. Opt.* **10**, 1415.  
 M.Harwit: 1973, *Appl. Opt.* **12**, 285.  
 A.Girard: 1960, *Optica Acta*, **1**, 81.  
 К.И.Тарасов, В.В.Гуд: 1974, *Изв. вузов. Приборостроение*, **17**, 106.  
 Ю.Ф.Антропов: 1972, *Новая техника в астрономии*, **4**, 75.  
 P.V.Fellgett: 1955, *Optica Acta*, **2**, 9.  
 R.F.Griffin: 1967, *ApJ*, **148**, 465.  
 В.П.Лебедев: 1978, *Оптика и спектроскопия*, **45**, 222.  
 А.Н.Малахов: 1978, *Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований*, М.: Советское радио, 376 с.  
 И.Е.Кожеватов, Е.Х.Куликова, Н.П.Черагин: 1995, *Оптика и спектроскопия*, **78**, 536.  
 Л.В.Дидковский, И.Е.Кожеватов, Н.Н.Степанян: 1986, *Изв. КрАО*, **74**, 142.  
 И.Е.Кожеватов: 1983, *Исследования по геомагнетизму, астрономии и физике Солнца*, **64**, 42.