

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДОПЛЕРОВСКИХ СМЕЩЕНИЙ

Панчук В.Е.¹, Клочкова В.Г.¹, Насонов Д.С.²

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН

²Московский государственный университет

Одной из характерных особенностей современной практической астрофизики является тенденция расширения круга объектов, к которым применяются новые методы и эксперименты. Например, вначале метод моделей атмосфер применялся к отдельным звездам, а затем стал массовым. То же можно сказать и о методах спектрополяриметрических измерений поверхностных магнитных полей. Не составляет исключение и техника высокоточного измерения доплеровских смещений спектральных линий: если ранее исследовались самые яркие звезды неба, то теперь — большинство звезд, видных невооруженным глазом. Существует два направления, где необходимы высокоточные и многократные определения лучевых скоростей большого числа звезд: а) исследование спектра звездных пульсаций, для изучения внутреннего строения звезд — астеросейсмология; б) поиск и исследование внесолнечных планетных систем, для накопления статистики параметров планетных систем. В этих задачах применяется классический способ получения точности порядка 10 м/сек — наблюдения на дифракционных спектрографах с $R = \lambda/\delta\lambda = 10^5$, сопровождаемые специальными методами калибровки.

Приведем некоторые оценки возможностей классического метода. Пусть типичная ширина спектральной линии $s \sim 0.1 \text{ \AA}$, и требуется измерить смещение линии ε , составляющее от 10^{-4} до 10^{-6} этой величины. При этом предъявляются высокие требования к позиционной стабильности спектрографа, которую следует контролировать в течение длительного времени (месяцы и годы). Если ширина аппаратной функции спектрографа p много меньше ширины линии s , т.е. $p \ll s$, то сдвиг на величину ε приведет к изменению амплитуды сигнала $\varepsilon/2s$, т.е. около 10^{-6} (т.к. на практике при разработке спектрографа и проведении наблюдений ограничиваются соотношением $p = s/3$). Это означает высокие требования не только к R , но и к отношению сигнал/шум S/N . Например, на спектрометре с $p = 0.03 \text{ \AA}$, $\lambda = 5000 \text{ \AA}$, для обеспечения точности измерения в 1 м/сек по одной линии шириной $s = 0.1 \text{ \AA}$, (когда сдвиг составляет 1/2000 долю ши-

рины аппаратной функции, а соответствующее изменение амплитуды составит 1.6×10^{-4}), требуется собрать 4×10^7 фотонов, что эквивалентно наблюдениям самых ярких звезд на 4-метровом телескопе. Использование большого числа линий позволяет выиграть в проникающей способности метода около 3-х звездных величин. После ввода в эксплуатацию спектрографа HARPS на 3.6 м телескопе ESO были получены близкие оценки.

Итак, в задачах, требующих точности $\sigma(V_R) = 1 \text{ м/сек}$, возможности дифракционных спектрографов достигли предела по следующим причинам: а) на 4-метровых инструментах доступны звезды $m_V < 6$; б) трудно ожидать, что в ближайшее время появятся обзорные телескопы с $D > 4 \text{ м}$; в) на больших телескопах трудно обеспечить высокое разрешение, $R > 10^5$, полностью сохраняя свободный спектральный интервал $\Delta\lambda$ и минимизируя потери света; г) однообъектный режим наблюдений (при двумерном формате эшелле спектра), является неэкономичным в обзорных задачах.

Обратимся к истории, напомним вначале о двух хрестоматийных публикациях. Любая система, разделяющая длины волн λ на величину $\delta\lambda$, может быть охарактеризована произведением спектрального разрешения $R = \lambda/\delta\lambda$ на пропускание $L = A\omega$. Здесь A — площадь зрачка системы, заполняемая под телесным углом ω . Жакино [1] показал, что произведение RL является инвариантом для данного типа спектральных инструментов, и что при одинаковой площади, интерферометры по величине RL превосходят призмные и дифракционные спектрометры приблизительно на два порядка. Способность интерферометра пропускать большое количество энергии при высоком спектральном разрешении получила название «выигрыш Жакино».

При равной чувствительности приемников, сканирующий спектрометр уступает в $N^{1/2}$ раз (по производительности), спектрографу, имеющему N каналов. Фэлжет [2] предложил метод мультиплексирования одноканального приемника. Суть метода состоит в использовании взаимно ортогонально модулированных компонент спектра. Техниче-

ски это достигается путем интерференции. В интерферометре информация обо всем спектральном диапазоне получается за любой (в т.ч. и единичный), интервал сканирования. Фэлжет рассмотрел два случая, «А» и «Б». А) Сканирующий дифракционный спектрометр (G) с одноканальным приемником, ФЭУ, шум которого пропорционален сигналу. Если M — число элементов, а T — время сканирования всего спектра, то отношение сигнал/шум $(S/N)_G \sim (T/M)^{1/2}$. Б) Сканирующий интерферометр (I) с приемником, шум которого случаен и не зависит от уровня сигнала, тогда $(S/N)_I \sim T^{1/2}$. Таким образом, у интерференционного прибора преимущество перед сканирующим дифракционным спектрометром в $M^{1/2}$. В эпоху одноканальных фотоэлектрических приемников излучения выигрыш Фэлжета проявлялся в ИК-диапазоне, где шум приемника не зависит от уровня сигнала, и на больших потоках, где этим шумом можно было пренебречь.

За счет выигрышей Жакино и Фэлжета и появились достоинства метода Фурье-спектроскопии в инфракрасном диапазоне. Однако возможности метода серьезно ограничивались состоянием вычислительной техники 60-х годов.

Появление и совершенствование твердотельных линейных и матричных приемников, шумы которых (т.н. шумы считывания), не зависят от уровня сигнала, сделало, казалось, выигрыш Фэлжета — достоянием истории спектроскопии. Время регистрации спектра снизилось пропорционально числу каналов, и многоканальные дифракционные спектрографы видимого диапазона уравнились (по крайней мере, в теоретических оценках), с фурье-спектрометрами ИК-диапазона. А вот выигрыш Жакино, определяемый соотношением телесных углов целевых и интерференционных приборов, сохраняется и при смене приемников излучения. Почему же тогда большинство астрофизиков предпочитают дифракционные спектрографы интерференционным? Дело в том, что успехи технологии производства дифракционных решеток больших размеров, работающих в порядках $m = 50 - 100$, позволяют строить спектрографы с диаметром коллимированного пучка до 200 мм. Характерный размер пластин интерферометра Фабри-Перо (ИФП) составляет 50 мм, т.е. площадь зрачка системы (A) в 16 раз меньше, чем у дифракционного спектрографа, и преимущество ИФП частично теряется. Если учесть, что перестраиваемый ИФП регистрирует весь спектр за число экспозиций, равное фактору добротности интерферометра $\Delta\lambda/\delta\lambda$, то в этом режиме преимущество ИФП теряется практически полностью.

В работе [3] было, в частности, показано, что замена измерений смещений на измерения интенсивностей в избранных каналах, — позволяет обойти

основные инструментальные ошибки дифракционной спектроскопии в задаче измерения доплеровских смещений. Метод основан на использовании перестраиваемого ИФП на внешней установке (относительно эшелле-спектрографа с матрицей ПЗС), причем ИФП работает в центральном пятне, реализуя преимущество в светосиле. Работа [3] является одним из примеров того, как сочетания приборов различных классов (гибридные схемы) позволяют устранить влияние принципиальных недостатков спектрального прибора из низшего класса (в данном случае — недостатков эшелле-спектрографа). Скрещивая дисперсию ИФП с дисперсией эшелле-спектрографа, мы от задачи контроля габаритного спектрографа переходим к задаче контроля небольшого по размерам ИФП. В целом, проблемы учета инструментальных ошибок, накопившиеся в приборах данного класса, — ослаблены или устраняются, если в качестве основного взять спектральный прибор из высшего класса. Немаловажным достоинством гибридных схем является достижение рекордных значений одного из параметров (R , или L , или N), за счет некоторых потерь по другим параметрам.

Перечислим технические решения, демонстрирующие, по нашему мнению, преимущества и недостатки интерференционных и гибридных схем.

Северный [4] показал, что применение эталона Фабри-Перо для изучения фраунгоферовых линий эффективно даже при наличии спектрографа умеренной разрешающей силы. В бесцелевом спектрографе Линника [5] часть коллимированного пучка проходит через сложную стеклянную пластинку, которая формирует интерференционные реперы (полосы Гальбота), расположенные над изображением спектра звезды. Таким образом часть света звезды используется для формирования репера доплеровских измерений. К сожалению, спектрограф был исключен из списка спектральной аппаратуры БТА первого поколения.

В поляризационном интерферометре Серковского [6] создается искусственная поляризация, плоскость которой быстро вращается с длиной волны. Происходит интерференция обыкновенного и необыкновенного лучей. Для каждого угла положения поляроида измеряются интенсивности в каналах. Длина волны определяется по углам плоскости поляризации (чем обеспечивается равномерная калибровка по длинам волн), и не зависит от положения звезды на щели (из-за высокой широкощельности прибора). Потери света на поляризационной оптике составляли 20%, за 4 минуты накопления сигнала на 2-метровом телескопе обеспечивалась точность 1 км/сек для звезды $m_V = 10$.

Эшелле-спектрометр с ИФП на внешней установке использовался на 1.5-м телескопе LPL [7]. Сканирование спектра осуществлялось наклоном ИФП,

контроль интерферометра проводился He-Ne лазером.

Интерферометр Фабри-Перо был использован в баллонном УФ-эксперименте [8], сканирование по длинам волн осуществлялось оптикой телескопа, спектр регистрировался на фотопленку. Эта же группа исследователей в наземном эксперименте на 0.9 м телескопе RGO применила интерферометр в коллимированном пучке спектрографа, ИФП был наклонен к оси пучка так, что направление его дисперсии перпендикулярно направлению дисперсии эшелле [9]. Свободный спектральный интервал составил $FSR = 0.3 \text{ \AA}$, спектральное разрешение $R = 500000$.

Следующим прогрессивным шагом явилась идея использования интерферометра постоянного сдвига для измерения лучевых скоростей [10]. Метод был реализован при наблюдениях спектра фотосферы Солнца, причем для измерения 4-х интегральных параметров (центр тяжести, ширина, асимметрия, площадь), использовались два интерферометра с различными разностями хода [11]. При доплеровском картографировании поверхности Солнца была достигнута точность измерения лучевой скорости 3 м/сек.

Внедрение многоэлементных приемников возродило интерес к некоторым классическим решениям. Например, пространственный гетеродинный спектрометр (SHS) отличается от SISAM применением многоэлементного приемника [12]. Для работы в FUV-диапазоне были выдержаны высокие требования к точности поверхностей и конструкции. Конструкция гетеродинного голографического спектрометра (HHS) также не содержит подвижных элементов [13]. Дифракционная решетка находится внутри интерферометра, различные длины волн комбинируются в диапазоне углов, образуя на выходе интерферометра системы полос с резко изменяющимся периодом. Поэтому как SHS, так и HHS эффективны в узком спектральном интервале. Итак, сочетание классических интерференционных схем с многоэлементными приемниками позволяет обойти проблему точного перемещения оптических элементов.

Чтобы для каждой длины волны интерференция происходила под одним и тем же углом, следует применить интерферометр белого света. Так приходим к идее EDI — внешнего постдисперсера (спектрографа низкого разрешения), размещенного после интерферометра Майкельсона с фиксированной разностью хода d [14]. Эта схема служит для выделения интерференционной картины внутри каждой спектральной линии в широком диапазоне длин волн. ИФП на внешней установке был использован с эшелле-спектрографом и матрицей ПЗС [15]. Такую схему отличает «неудобная» функция полос вдоль щели, что не позволяет использовать преимущества фурье-анализа или обработки экспозиций, получен-

ных со сдвигом фаз. Однако, как и в схеме EDI, доплеровский сдвиг полос в [15] приблизительно одинаков для широкого диапазона длин волн. Вместо интерферометра Майкельсона перед постдисперсером низкого разрешения можно установить фурье-спектрометр [16].

Рассмотрим качественное поведение ошибки измерения лучевой скорости $\sigma(V_R)$ в разных схемах. Если сравнивать дифракционный спектрограф среднего разрешения и эшелле-спектрограф высокого разрешения, то последний предпочтительнее, т.к. характер зависимости ошибки от сигнала, накопленного в полосе, различен для случая, когда линия недооценена ($p > s$), или переоценена ($p < s$), см., например, [17]. Ошибка измерения по одной линии пропорциональна $(p/s)^{3/2}$ и обратно пропорциональна квадратному корню из потока в полосе $F_i^{1/2}$. Однако требование переоценки узких линий приводит к величине $R = 10^5$, которую на больших телескопах трудно обеспечить без существенных потерь света на входе спектрографа. При измерении сдвига интерференционных полос, ошибка скорости $\sigma(V_R)$ пропорциональна величине постоянного сдвига d , контрасту интерференционной полосы γ_i и обратно пропорциональна квадратному корню из потока $F_i^{1/2}$. Таким образом, фактор переоценки линии, решающий при выборе эшелле-спектрографа, в гибридной схеме не фигурирует. Величину постоянного сдвига можно оптимизировать из условия максимального контраста интерференционной полосы для гауссовой формы линии, но контраст полос будет снижаться, когда соседние полосы начинают перекрываться при понижении спектрального разрешения постдисперсера. Итак, вместо фактора переоценки линий для классического дифракционного спектрографа, в гибридной схеме появляется условие перекрытия соседних интерференционных полос. Поэтому в гибридной схеме спектральное разрешение постдисперсера можно понизить. Если интерферометр скрещивается с эшелле-спектрографом [15], то относительно низкое пропускание спектрографа компенсируется только высокой широкощельностью интерферометра, а потери на поверхностях спектрографа сохраняются. Если интерферометр скрещивается с обычным дифракционным спектрографом среднего разрешения [14], работающим в низком порядке дифракции, то дополнительный выигрыш в светосиле обеспечивается за счет меньших потерь на поверхностях спектрографа. Соотношение пропусканий дифракционного спектрографа среднего разрешения и эшелле-спектрографа высокого разрешения различается от нескольких раз до одного порядка. Так как ошибка измерения обратно пропорциональна квадратному корню из потока в полосе, то переход к постдисперсеру среднего разрешения обеспечит выиг-

рыш в пропускании, при заданной $\sigma(V_R)$, на одну-две звездные величины. Аппаратная функция постдисперсера заведомо шире контура линии, поэтому контраст интерференционных полос снижается за счет вклада крыльев линии и соседних участков континуума [18]. Ошибка измерения скорости должна возрастать в $(p/s)^{1/2}$ раз за счет снижения контраста полос, но на такой же коэффициент ошибка должна снижаться за счет увеличения числа линий, если при понижении разрешения постдисперсера (т.е. увеличении p), пропорционально увеличивается одновременно регистрируемый диапазон длин волн (т.е. увеличивается число линий, каждая из которых формирует свои интерференционные полосы). Таким образом, в первом приближении общая доплеровская ошибка не зависит (или слабо зависит) от спектрального разрешения постдисперсера. Независимость доплеровской чувствительности в схеме EDI от спектрального разрешения постдисперсера, в сочетании с высоким пропусканием систем среднего разрешения по сравнению с пропусканием эшелле-систем, позволяет выиграть в эффективности метода более одного порядка. Точный ответ на вопрос об оптимальном разрешении постдисперсера мы надеемся получить путем численного моделирования.

Положение интерференционных полос в схеме EDI определяется не только лучевой скоростью, но и стабильностью входной апертуры, поэтому необходимым условием является оптоволоконное сочетание интерферометра с телескопом. Это обстоятельство может оказаться полезным, если в поле зрения телескопа есть несколько объектов, лучевую скорость которых можно измерить одновременно и с высокой точностью. Оптимальным (по соотношению «диаметр поля — диаметр телескопа»), для такой задачи является проект LAMOST. Возможность применения интерферометров в оптоволоконных спектрографах этого проекта отмечена в [19]. Добавим, что вариант питания одного из оптических волокон многообъектного интерферометра от небольшого вспомогательного телескопа открывает возможность калибровки интерферометра по яркой звезде или по участку лунной поверхности.

Литература

1. Jacquinet P.: 1954, *JOSA*, **44**, 761.
2. Fellgett P.: 1958, *Journ. Phys.*, **19**, 237.
3. Панчук В.Е., Алиев А.Н.: 2004, *Препринт CAO*, No. 204.
4. Северный А.Б.: 1951, *Изв. КРАО*, **7**, 59.
5. Линник В.П.: 1961, в: *сб. Новая техника в астрономии*, **1**, 176.
6. Serkowski K.: 1972, *PASP*, **84**, 649.
7. Serkowski K. et al.: 1979, *ApJ*, **228**, 630.
8. Bates B. et al.: 1978, *Appl. Opt.*, **17**, No. 13, 2119.
9. Bates B. et al.: 1978, in: *Proc. 4th Trieste Coll.*, 420.
10. Горский С.М., Лебедев В.П.: 1977, *Изв. КРАО*, **57**, 228.
11. Дидковский Л.В., Кожеватов И.Е., Степанян Н.Н.: 1986, *Изв. КРАО*, **74**, 142.
12. Harlander J. et al.: 1992, *ApJ*, **396**, 730.
13. Frandsen S.S. et al.: 1993, *A&A*, **279**, 310.
14. Erskine D., Ge J.: 2000, *ASP Conf. Ser.*, **195**, 501.
15. Панчук В.Е.: 2000, *Препринт CAO*, No. 144.
16. Mosser B. et al.: 2003, *PASP*, **115**, 990.
17. Gustafsson B.: 1992, in: *ESO Workshop on "High Resolution Spectroscopy with the VLT"*, Garching, 11-13 Feb. 1992, p. 17.
18. Erskine D.: 2003, *PASP*, **115**, 255.
19. Panchuk V., Klochkova V., Zhao G.: 2001, in: *Proc. of The 5th Sino-German Workshop on Astrophysics, Urumqi, China, Sept. 1999*. Eds. G., J.-J. Wang, Zhao and H.-M. Qiu, p. 177.