

УДК 520.24

С. Н. Осипов

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680
osipov@mao.kiev.ua

Инструментальный контур спектрографа солнечного телескопа АЦУ-5 Главной астрономической обсерватории НАН Украины

Описано устройство, позволяющее быстро и точно измерять инструментальный контур (ИК) спектрографа высокого разрешения с помощью источника монохроматического излучения. Переход от наблюдений спектра Солнца к измерению ИК и обратно осуществляется поворотом только одного дополнительного зеркала целостата. Используя газовый He-Ne-лазер ЛГН-302, на спектрографе солнечного телескопа АЦУ-5 проведены измерения ИК во 2-м, 3-м и 4-м порядках спектра на длине волны 632.9 нм. Мониторинг ИК на протяжении наблюдательного сезона показал изменение полуширин ИК в пределах 10 % и зависимость ИК от температуры воздуха в спектрографе. Отмечается важность учета различий ИК некогерентного солнечного света и частично когерентного пучка от лазера. Предложена методика оценки степени когерентности лазерного пучка при измерении ИК.

ІНСТРУМЕНТАЛЬНИЙ КОНТУР СПЕКТРОГРАФА СОНЯЧНОГО ТЕЛЕСКОПА АЦУ-5 ГОЛОВНОЇ АСТРОНОМІЧНОЇ ОБСЕРВАТОРІЇ НАН УКРАЇНИ, Осіпов С. М. — Описано прилад, який дозволяє швидко і точно виміряти інструментальний контур (ІК) спектрографа високої роздільної здатності за допомогою джерела монохроматичного випромінювання. Перехід від спостережень спектру Сонця до вимірювань ІК і навпаки здійснюється поворотом тільки одного додаткового дзеркала целостата. За допомогою газового He-Ne-лазера ЛГН-302 на спектрографі сонячного телескопа АЦУ-5 проведено вимірювання ІК у 2-му, 3-му і 4-му порядках спектру на довжині хвилі

632.9 нм. Моніторинг ІК протягом спостережного сезону виявив зміни півширини ІК у межах 10 % та залежність ІК від температури повітря у спектрографі. Наголошується важливість врахування відмінності ІК некогерентного сонячного світла і частково когерентного пучка від лазера. Запропонована методика оцінки ступеня когерентності лазерного пучка при вимірюваннях ІК.

THE INSTRUMENTAL PROFILE OF SPECTROGRAPH OF GOLOSIV SOLAR TELESCOPE ATSU-5, by Osipov S. N. — The device for exactly and quickly measurement of instrumental profile (IP) of high resolution spectrograph is described. The transfer from solar observation to IP measurements and backwards is carried out by rotation of coelostat additional mirror only. The measurements of IP in 2-nd, 3-th, and 4-th orders of grating are carried out with the spectrograph of solar telescope ATsU-5 using He-Ne gas laser LGN-302 ($\lambda = 632.9$ nm). The monitoring of IP during observational season is completed, during which the halfwidth of IP was varied within 10 %. The dependence of IP from temperature of spectrograph air is presented. The importance of taking into account the differences of non-coherence solar light and coherence laser beam is emphasized. The technique for estimation of coherence of laser beam is proposed.

ВВЕДЕНИЕ

Погрешности измерений спектра Солнца на спектрографах с высоким спектральным разрешением во многом зависят от точности имеющихся данных о профиле инструментального контура (ИК). По своей природе ИК не постоянен во времени и зависит от качества юстировки прибора, температурных изменений зеркал, усадок фундаментов, степени когерентности света и от других факторов.

Задача измерения ИК не представляет особых трудностей [1, 5—8]. Недостатком известных методов измерения ИК является необходимость монтажа дополнительной оптики перед входной щелью спектрографа, заменяющей оптические элементы телескопа и предназначенной для ввода в спектрограф монохроматического пучка с конусом расхождения, соответствующим относительному отверстию телескопа. Монтаж и юстировка такой системы, а затем и демонтаж, отнимает слишком много времени, чтобы обеспечить регулярный и качественный мониторинг ИК.

Кроме того, при нестандартных наблюдениях, когда используется широкая входная щель спектрографа или в оптическую систему телескопа введена дополнительная перехватывающая оптика, такая система может приводить к существенному искажению измеренного ИК. Дело в том, что при отсутствии дифракции на широкой входной щели заполнение дифракционной решетки зависит от условий освещения элементов оптической системы телескопа. Очень сложно обеспечить

идентичность такого заполнения для реальных наблюдений и при измерении ИК. Например, наличие в оптической системе телескопа небольшого диагонального зеркала, перехватывающего пучок, приводит к появлению темного незаполненного пятна на решетке. Смоделировать это пятно при измерениях ИК, не используя оптические элементы телескопа, практически невозможно.

В предлагаемом нами устройстве переюстировка от наблюдений Солнца к измерениям ИК и обратно проводится поворотом всего лишь одного зеркала. При этом при измерениях ИК используется почти вся оптическая система телескопа и обеспечивается идентичность заполнения всех оптических элементов при измерениях Солнца и ИК. Такое устройство позволяет проводить высококачественный регулярный мониторинг ИК.

ПРИНЦИП РАБОТЫ УСТРОЙСТВА

Наблюдения избранных участков спектра Солнца в Главной астрономической обсерватории НАН Украины выполняются на горизонтальном солнечном телескопе АЦУ-5 (рис. 1) и спектрографе АСП-20 (фокус главного зеркала 6966 мм, решетка 140 150 мм, 600 штр/мм). Спектрограф может работать либо в режиме монохроматора двойной дифракции [2, 3] с регистрацией спектра фотоумножителями ЕМІ, либо в классическом режиме однократной дифракции с регистрацией спектра ПЗС-камерой ST-8300M.

Для измерений ИК нами разработано специальное устройство (рис. 2), позволяющее быстро и точно получить профиль ИК на длине волны излучения используемого лазера.

Монохроматический пучок от лазера 6, отражаясь от плоского зеркала 7, проходит корректирующую сферическую линзу 8 и короткофокусную ($f = 5$ мм) цилиндрическую линзу 9, которая строит яркую полосу света на рассеивателе 10. Задача рассеивателя — обес-

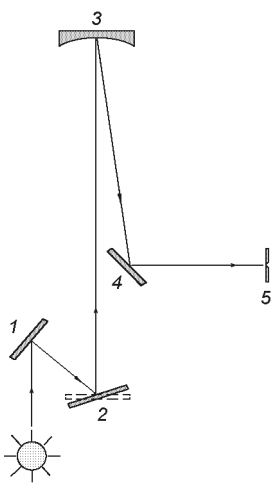


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема горизонтального солнечного телескопа АЦУ-5: 1 — целостат, 2 — дополнительное зеркало, 3 — главное зеркало, 4 — диагональное зеркало, 5 — входная щель спектрографа

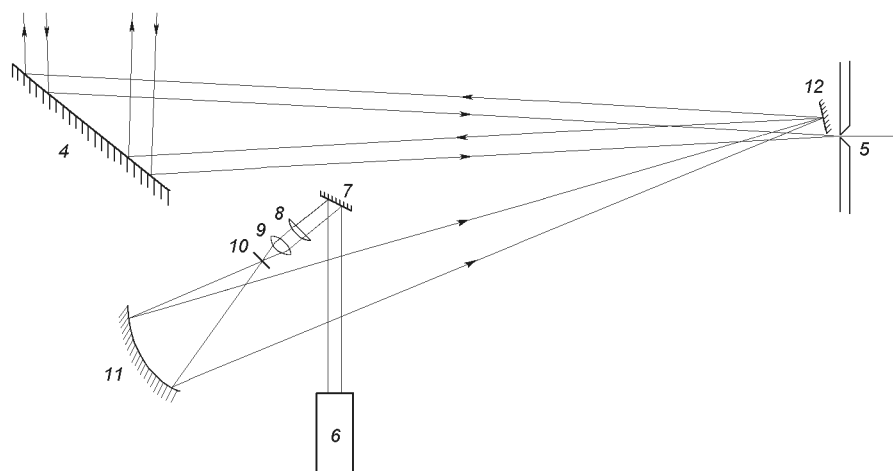


Рис. 2. Оптическая схема устройства для измерений ИК: 4 — диагональное зеркало, 5 — входная щель спектрографа, 6 — лазер ЛГН-302, 7 — плоское зеркало, 8 — корректирующая линза, 9 — цилиндрическая линза, 10 — матовое стекло, 11 — объектив, 12 — плоское зеркало

печить равномерное освещение поверхности дифракционной решетки. Рассеянные лучи перехватываются объективом 11, фокусирующим изображение яркой полосы на плоском зеркале 12, расположенном на минимальном расстоянии от входной щели спектрометра 5. Расходящийся световой пучок, отражаясь от диагонального зеркала телескопа 4, попадает на главное зеркало 3 (см. рис. 1), и затем параллельным пучком заполняет дополнительное зеркало целостата 2.

При измерениях ИК плоское зеркало 2 разворачивается перпендикулярно к лучам, идущим от зеркала 3, и отражает монохроматический пучок обратно на главное зеркало 3, которое фокусирует его в виде яркой монохроматической полосы света на входной щели 5 спектрографа. При этом отраженный от зеркала 2 лазерный пучок имеет оптический путь в телескопе и спектрографе, практически идентичный пучкам при наблюдениях Солнца. Примечательно, что переюстировка всей оптической системы при переходе от наблюдений Солнца к измерению ИК и обратно достигается путем поворота только одного зеркала 2 и занимает всего лишь несколько секунд! При этом оба рабочих положения зеркала 2 однозначно определяются визуально путем контроля расположения изображения Солнца или лазерного пучка на входной щели спектрографа.

Элементы 7—11 устройства смонтированы на металлической плите, закрепленной на фундаменте диагонального зеркала 4 и закрыты защитным кожухом, имеющим отверстия для входа и выхода лазерного пучка. Общие габариты вместе с кожухом 130 160 500 мм. Зеркало 12 закреплено на передней панели спектрографа предельно близко к входной щели 5. Расстояние между входной щелью и лазерным пучком, фокусируемом на зеркале 12, составляет около 3 мм. Располо-

жение лазера b достаточно произвольно. Мы расположили его на юстируемой подставке, смонтированной на соседнем фундаменте.

Таким образом, все узлы устройства не мешают проведению на телескопе различных наблюдательных и вспомогательных работ и не нуждаются в каких-либо юстировках при переходе от одного режима работ к другому.

Следует отметить, что лазер в качестве монохроматического источника был выбран нами не только с точки зрения простоты использования. Используемый в устройстве лазер имеет достаточную мощность для того, чтобы обеспечить освещенность приемника соизмеримую с освещенностями при наблюдениях Солнца, даже при использовании достаточно плотного рассеивателя 10 . Это дает возможность измерений при схожих экспозициях, а значит и при одинаковых внутренних лучевых скоростях в спектрографе.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерения ИК выполнены на длине волны излучения He-Ne-лазера ЛГН-302 $\lambda = 632.9$ нм. На рис. 3, *a* показаны контуры, полученные для 4-го порядков спектра при использовании спектрографа в режиме однократной и двукратной дифракции, а также для 2-го и 3-го порядков в стандартном режиме однократной дифракции. Измеренные полуширины ИК для однократной дифракции $H_2 = 4.26$ пм, $H_3 = 2.68$ пм, $H_4 = 1.94$ пм, а для режима двукратной дифракции — $H_4 = 1.35$ пм. Следует отметить, что без учета дисперсии самый узкий контур продемонстрировал 3-й порядок (рис. 3, *б*). Обращает внимание факт наличия мощных крыльев в ИК 4-го порядка, который, по-видимому,

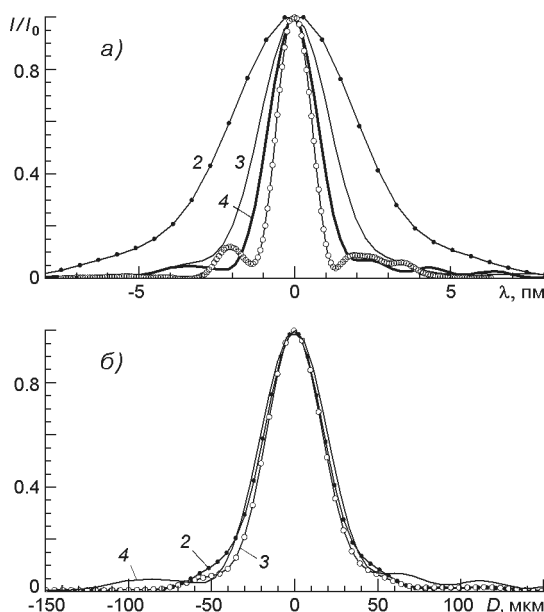
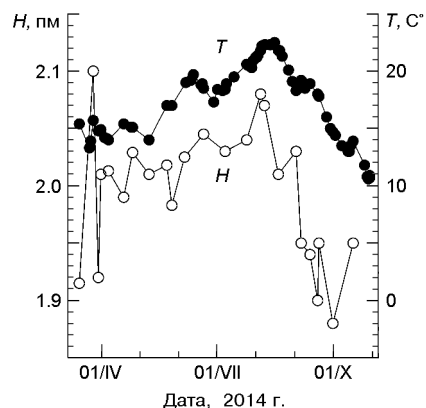


Рис. 3. Инструментальный контур спектрографа: *a* — измеренный в четвертом порядке спектра в режиме двукратной дифракции (кружки), а также во втором (2), третьем (3) и четвертом (4) порядках спектра в режиме однократной дифракции; *б* — без учета дисперсии в шкале линейных расстояний фокальной плоскости D для разных порядков спектра (цифры у кривых)

Рис. 4. Изменение полуширины H инструментального контура в четвертом порядке и температуры T воздуха в спектрографе в течение наблюдательного сезона 2014 г.



вызван коматической засветкой. Все измерения проводились при экспозиции 2-3 с при нормальной ширине щели. Не обнаружено никаких значимых отличий между ИК измерениями в разных местах щели.

Эксплуатация данного устройства в течение многих лет показала высокую эффективность его работы, что позволяет при необходимости выполнять измерения ИК несколько раз в течение наблюдательного дня.

На рис. 4 показано изменение полуширины ИК в четвертом порядке в течение наблюдательного сезона 2014 г. Видно, что в летние месяцы при прогреве зала спектрографа ИК ухудшается. По-видимому, сферичность поверхности главного зеркала спектрографа ближе к идеальной при более низких температурах. На качество ИК влияют также температурные усадки фундаментов и оправ оптики, которые, как и зеркала, могут иметь существенную инерционность, в отличие от изменений температуры воздуха, приведенных на рис. 4. До 29.03.14 г. были включены батареи отопления павильона телескопа. Их выключение за несколько часов до измерений было достаточным, чтобы стабилизировать температуру в помещении, но, по-видимому, недостаточным для того, чтобы исчезли температурные градиенты в самих зеркалах и механических конструкциях спектрографа. Именно этим объясняются скачки величин H , измеренных в марте. Очевидно, что в будущем будет правильным выключать отопление павильона за несколько дней до проведения наблюдений.

Из рис. 4 следует, что для корректного мониторинга достаточно ограничиться измерением ИК один раз в несколько дней при условии отсутствия переюстировок системы.

ПРОБЛЕМА КОГЕРЕНТНОСТИ

Использование лазера в качестве монохроматического источника света, помимо указанных выше достоинств, имеет один существенный недостаток. Лазер, в отличие от Солнца, является источником когерентного света.

Поэтому перед исправлением наблюдаемого солнечного спектра за влияние ИК необходимо пересчитать профиль ИК, измеренный нами, для условий некогерентного освещения, т. е. решить проблему когерентности света.

Хорошо известно [4], что ИК при когерентном и некогерентном освещении существенно различаются. Для некогерентного света его профиль определяется формулой

$$F(x) = \int_{-a/2}^{a/2} \frac{\sin^2[(x-x')/l]}{[(x-x')/l]^2} dx', \quad (1)$$

а для когерентного света —

$$F(x) = \int_{-a/2}^{a/2} \frac{\sin[(x-x')/l]}{[(x-x')/l]} dx', \quad (2)$$

где a — ширина изображения щели, $dl = F/b$, F — фокус камерного зеркала, b — линейный размер диафрагмы, ограничивающей ширину пучка, λ — длина волны, x и x' — расстояния соответственно от центра щели и от центра изображения щели, отсчитываемые вдоль дисперсии.

Несложно рассчитать ИК для некогерентного света исходя из измеренного ИК когерентного света. Но пространственная когерентность заметно ухудшается при прохождении когерентного излучения через оптически неоднородные материалы. В нашем устройстве рассеиватель 10 оптически неоднороден, и после него лазерный пучок нельзя считать полностью когерентным. Как оценить степень когерентности света при измерениях ИК?

Мы предлагаем сделать такие оценки путем сравнения наблюдаемых и расчетных зависимостей полуширины H от выбранной ширины h входной щели спектрографа. На рис. 5 видно, что такие зависимости для когерентного и некогерентного света сильно различаются.

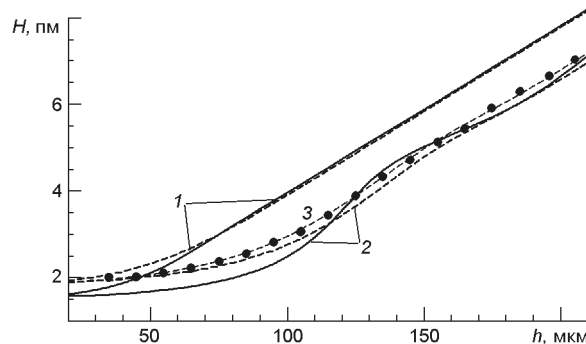


Рис. 5. Изменение полуширины инструментального контура H при разных ширинах входной щели h . Показаны рассчитанные зависимости для некогерентного (1) и когерентного (2) освещения с добавлением фактора замыывания (верхняя и нижняя пунктирные кривые), измерения (точки) и смесь когерентного (20 %) с некогерентным (80 %) светом (средняя пунктирная кривая)

Волноподобная зависимость для когерентного света соответствует результатам, приведенным на рис. 3.14 и 3.15 в работе [4]. Проведены также расчеты ИК при добавлении фактора замывания, которое моделирует совместное воздействие погрешностей фокусировок зеркал, их aberrаций, дрожания изображения, неплоскостности решетки и т. п. Замывание сглаживает волноподобную зависимость H от h для когерентного света. Из рис. 5 видно, что наилучшее согласование расчетов с наблюдениями достигается при степени когерентности $K = 0.8$ (смесь 80 % когерентного и 20 % некогерентного света). Следует отметить, что при уменьшении экспозиции до менее 0.5 с степень когерентности резко возрастает. Причиной этого является нестабильность оптических свойств воздуха в телескопе. Вызванное вследствие этого дрожание изображения на рассеивателе 10 (рис. 2) приводит к ухудшению пространственной когерентности, особенно при суммировании сигнала на больших интервалах времени.

Следует отметить, что в наших экспериментах обнаружена также существенная зависимость степени когерентности от материала выбранного рассеивателя. Результаты, приведенные в настоящей работе, получены при использовании в качестве рассеивателя сложной композиции из матового стекла и четырехслойной бумажной кальки.

ВЫВОДЫ

Таким образом, можно утверждать, что на представленном устройстве можно быстро и точно определять ИК спектрографа. ИК заметно изменяется в зависимости от температуры в спектрографе. Степень когерентности света при измерении ИК можно определить экспериментально. Учитывая, что искажения ИК, вносимые несовершенством оптики и юстировок, не зависят от степени когерентности, можно измеренный ИК для частично когерентного света трансформировать в ИК для некогерентного света. Ядро такого контура достаточно неплохо можно представить сверткой теоретического профиля и функции замывания, описывающей недостатки используемой оптики. Крылья ИК моделировать значительно сложнее.

Открытым является и вопрос о том, как изменяется функция замывания для разных углов поворота решетки. Поэтому задача исследования изменения ИК для разных длин волн является актуальной и будет предметом наших дальнейших исследований.

1. Ганджа С. И. Инструментальный контур V порядка солнечного спектрографа ГАО АН УССР // Астрометрия и астрофизика.—1984.—Вып. 52,—С. 49—52.
2. Гуртовенко Э. А. Солнечная спектроскопия высокого разрешения с монохроматорами двойной дифракции // Астрометрия и астрофизика.—1980.—Вып. 41.—С. 15—28.
3. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Монохроматор двойной дифракции ГАО АН УССР с цифровым устройством для наблюдений и обработки солнечного

- спектра // Астрометрия и астрофизика.—1979.—Вып. 39.—С. 88—94.
4. Зайдель А. Н., Островская Г. В., Островский Ю. И. Техника и практика спектроскопии. — М.: Наука, 1976.—392 с.
 5. Карпинский В. Н. Методика определения контуров линий солнечного спектра с фотоэлектрическим монохроматором двойного прохождения // Изв. ГАО АН СССР.—1965.—**24**, вып. 2, № 178.—С. 84—143.
 6. Кохан Е. А., Печинская Н. И. Инструментальный контур спектрофотометра двойной дифракции с цифровой регистрацией // Солнеч. данные.—1973.—**12**.—С. 84—89.
 7. Gurtovenko E. A., Fedorenko L. I. The use of a laser beam for investigating the instrumental profile of a double-pass solar spectrograph // Solar Phys.—1969.—**6**.—P. 465—475.
 8. van Bueren Y. G., Nieuwenhuijzen H. Determination of the instrumental profile of the Utrecht Solar Spectrograph by use of a laser // Bull. Astron. Inst. Netherl.—1966.—**18**, N 3.—P. 170—174.

Статья поступила в редакцию 23.04.15