

УДК 520.24

Способ калибровки измерений продольного магнитного поля и дифференциальной лучевой скорости

М. Л. Демидов, Н. И. Кобанов, В. М. Григорьев

Предлагается новый способ калибровки магнитографов и приборов, предназначенных для измерений дифференциальной лучевой скорости. Этот способ обеспечивает значительно более высокую (по сравнению с ранее известными) точность калибровки, проводится практически при тех же условиях, что и рабочие наблюдения, и обладает, по мнению авторов, некоторыми преимуществами в эксплуатации.

A CALIBRATION METHOD FOR MEASUREMENTS OF THE LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD AND DIFFERENTIAL RADIAL VELOCITY, by Demidov M. L., Kobanov N. I., Grigor'ev V. M.—A new method of calibration of magnetographs and instruments designed for measuring the differential radial velocity is suggested. The method provides an improved calibration accuracy, can be carried out under virtually the same conditions as routine observations, and offers some better operational characteristics.

Прежде чем приступить к описанию нового типа калибровки, напомним о принципах измерений продольных магнитных полей и способах их калибровки. Измерения продольной составляющей магнитного поля основаны на продольном эффекте Зеемана. При наблюдении вдоль поля спектральная линия поглощения с длиной волны λ_0 расщепляется на два компонента с длинами волн $\lambda_0 + \Delta\lambda_H$ и $\lambda_0 - \Delta\lambda_H$, поляризованными по кругу в противоположных направлениях. Величина расщепления выражается формулой

$$\Delta\lambda_H = \pm 0.467g\lambda_0^2H, \quad (1)$$

где g — фактор Ланде, характеризующий чувствительность линии к магнитному полю (H — в Гл; λ_0 — в см). В сильных полях величина расщепления сравнима с шириной спектральной линии и может быть измерена непосредственно на спектрограммах. В случае слабых магнитных полей компоненты расщепления сильно блендированы, и регистрация основана на измерении поляризации в крыле линии.

Принцип магнитографов продольного поля заключается в попеременном выделении противоположно поляризованных компонентов расщепления и измерении флуктуаций интенсивности в крыле линии. Обычно для этого применяются электрооптические анализаторы поляризации, которые под управлением синусоидального или прямоугольного напряжения обеспечивают выделение противоположно поляризованных компонентов спектральной линии.

На рис. 1 схематически показано положение компонентов спектральной линии в фокальной плоскости спектрографа и принцип формирования сигнала — флуктуации яркости в крыле линии (отмечено штриховкой), пропорционального крутизне контура и расстоянию между компонентами линии

$$\delta I = I_0^c \frac{\partial r}{\partial \lambda} \Delta\lambda, \quad (2)$$

где I_0^c — яркость непрерывного спектра; r — глубина контура линии. При измерении слабых магнитных полей ширина и положение выходных щелей спектрографа относительно контура линии выбираются так, чтобы крутизна контура практически не изменялась в некотором диапазоне изменения величины расщепления. Так обеспечивается линейность калибровочной кривой, и калибровка сводится к определению коэффициента пропорциональности между сигналом и величиной расщепления.

Обычно линейность калибровочной кривой обеспечивается до напряженности поля 0.05—0.07 Тл.

Принцип измерения магнитного расщепления спектральной линии сохраняется в дифференциальных методах измерения лучевых скоростей [1, 3, 9, 12, 13]. Различными способами [1, 3, 9, 13] осуществляется взаимноортогональная поляризация светового потока различных участков изображения и последующая модуляция с помощью того же анализатора поляризации солнечного магнитографа. В этом случае в одну из

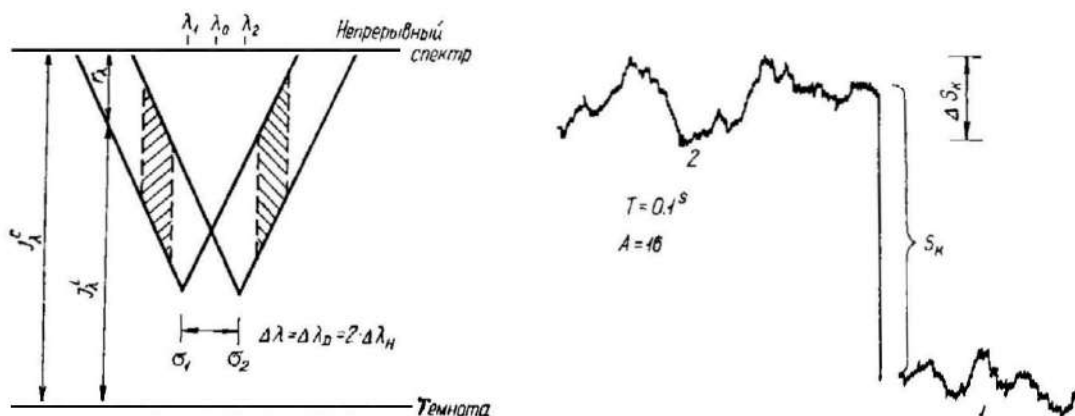


Рис. 1. Схематическое изображение картины расщепления в продольном магнитном поле магниточувствительной спектральной линии: λ_0 —длина волны линии при отсутствии магнитного поля; λ_1 и λ_2 —длины волн компонентов расщепления; I_{λ}^c и I_{λ}^l —интенсивности света в непрерывном спектре и в линии; r_{λ} —глубина контура линии на некоторой длине волны λ . Штриховкой показаны флуктуации светового потока на установленных в крыльях линии щелях фотометра при поочередном гашении компонентов расщепления

Рис. 2. Типичный пример записи калибровки с помощью поворота на фиксированный угол плоскопараллельной пластинки компенсатора лучевых скоростей. T и A —время интегрирования сигнала и коэффициент ослабления

фаз модуляции в фокальной плоскости спектрографа спектральная линия формируется светом от одного участка изображения Солнца, в другую фазу модуляции—от другого участка. Расстояние между последовательными положениями спектральной линии определяет относительную лучевую скорость движения этих двух участков солнечного изображения.

Таким образом, выражение (2) для сигнала является общим для измерения магнитного поля и дифференциальной лучевой скорости, только в первом случае $\Delta\lambda = 2\Delta\lambda_H$, а во втором

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_V = (V/c) \lambda_0, \quad (3)$$

где V —относительная лучевая скорость.

Калибровка сигналов при измерениях магнитного поля и дифференциальной лучевой скорости на практике осуществляется регистрацией сигнала S_K , соответствующего известной величине смещения спектральной линии на выходных щелях фотометра, которое с помощью формул (1) и (3) связано с калибровочными значениями H_K и V_K соответственно. Измеряемая напряженность поля H_K связана с сигналом S_K следующим соотношением:

$$H_K = (A_K/A_N) (T_K/T_N) (S_N/S_K) H_N, \quad (4)$$

где A_K и T_K —соответственно коэффициенты ослабления и время накопления сигнала при калибровке, а A_N и T_N —то же при измерении.

Важное требование к процедуре калибровки—наиболее полное соответствие условий ее выполнения условиям, присущим реальному процессу наблюдений. Прежде всего к таким условиям относится обес-

печение неизменности профиля спектральной линии в процедурах измерений и калибровки. Это условие не выполняется при способе калибровки с использованием искусственного источника света, помещенного в магнитное поле лабораторного магнита [8], и в широко используемом методе записи сигнала доплеровского смещения линии на E и W краях Солнца, вызванного его вращением [7].

От отмеченного недостатка свободен способ калибровки, в котором сдвиг спектральной линии на известную величину осуществляется поворотом плоскопараллельной пластинки компенсатора лучевых скоростей

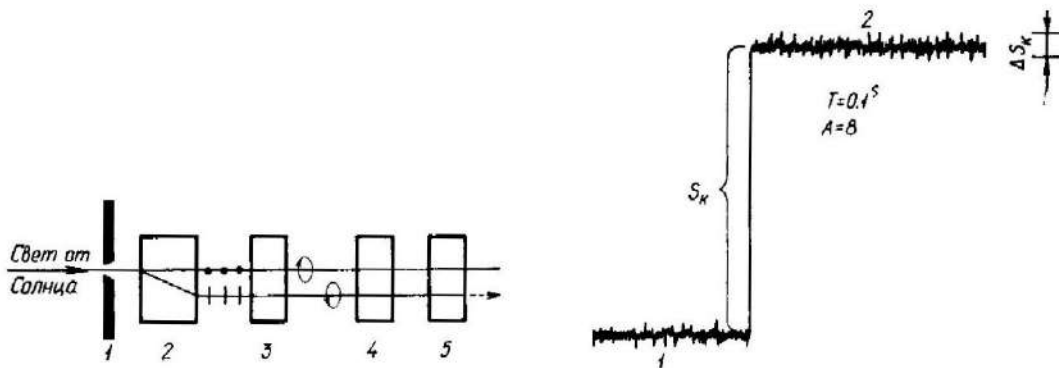


Рис. 3. Оптическая схема, поясняющая принцип действия нового способа калибровки (см. текст)

Рис. 4. Типичный пример записи калибровки новым способом

[4—6, 13] или же смещением каретки фотометра относительно спектральной линии [9—11, 14]. Однако при таком способе калибровки остаются погрешности, вызванные смещениями линии из-за турбулентности воздуха в спектрографе, изменений давления, температуры и вибраций оптико-механических узлов инструмента. На рис. 2 показан типичный пример записи такой калибровки, сделанной на солнечном телескопе оперативных прогнозов (СТОП) Саянской солнечной обсерватории.

На рис. 2 запись 1 сделана при приблизительно симметричном положении линии относительно щелей фотометра, а запись 2 — при смещенном так, что амплитуда калибровочного сигнала S_k соответствует полю 0.07 Тл для линии Fe I λ 525.0 нм, с которой выполнена калибровка. Видно, что шумы ΔS_k довольно велики и при указанной амплитуде сигнала приводят приблизительно к 20 %-ной неопределенности калибровки, а значит, и самих измерений. Впрочем, на термостатированных и вакуумных спектрографах отмеченные ошибки калибровки должны быть значительно меньше.

Практически свободен от описанных недостатков новый способ калибровки [2]. Схема, поясняющая принцип действия этого способа, реализованного на СТОП, показана на рис. 3. Входная щель спектрографа 1 освещается или параллельным пучком света, когда проводятся интегральные наблюдения Солнца, или светом того участка изображения, в котором предполагается проводить измерения. Непосредственно за входной щелью перед модулятором (4 — электрооптический кристалл, 5 — поляризатор) располагается калибровочная насадка, состоящая из кальцитовой призмы (2) и $\lambda/4$ фазовой пластинки (3). Элементы калибровочной насадки легко могут быть введены в пучок при калибровке и выведены из него при наблюдениях.

Каждый луч света, прошедший кальцитовую призму, расщепится на два ортогонально линейно-поляризованных луча, расстояние Δ между которыми принимается за калибровочное и определяется по простой формуле

$$\Delta = d \operatorname{tg} 6^\circ 12' = 0.11d, \quad (5)$$

где d — толщина кальцита. Конкретное значение величины расщепления должно подбираться из тех соображений, как уже отмечалось, чтобы щели фотометра приходились на линейные участки контуров линий. В частности, для линии Fe I λ 525.0 нм легко показать, что при дисперсии спектрографа $D=0.04$ нм/мм для $H_k=0.5$ Тл значение Δ должно быть равным 0.095 мм. Поскольку лучи из призмы выходят параллельно друг другу под тем же углом, что и входящий луч, а расстояние между ними менее 0.1 мм, то условия заполнения коллиматора спектрографа во время калибровки и работы одинаковы. Фазовая $\lambda/4$ пластинка ориентирована так, чтобы выходящие из нее расщепленные лучи были поляризованы по кругу.

Таким образом, в фокальной плоскости спектрографа каждая спектральная линия, в том числе и рабочая, окажется расщепленной на две составляющие (рис. 1), т. е. возникает ситуация, весьма близкая к наблюдающейся при измерении продольного магнитного поля (продольный эффект Зеемана) и при измерении дифференциальной лучевой скорости. Различие состоит в том, что расщепление спектральной линии произошло не в результате эффекта Зеемана или дифференциальной доплеровской скорости, а в результате искусственного расщепления лучей за входной щелью спектрографа. При подаче на электрооптический кристалл 4 знакопеременного $\lambda/4$ напряжения в один такт работы через поляризатор 5 будет проходить один луч, а в следующий такт — другой, и расположенные в крыльях линии фотоприемники регистрируют флуктуации интенсивности света, пропорциональные величине расщепления. Так как оба луча распространяются практически по одному и тому же оптическому пути, то любые смещения вследствие турбулентности или деформаций отражаются на обоих лучах одинаково и не дают вклада в полезный сигнал. Поскольку можно проводить калибровку, к тому же, и с работающим компенсатором лучевых скоростей, то следует ожидать вообще сведения уровня шумов к минимуму.

На рис. 4 показан пример записи калибровки новым способом. Линия Fe I λ 525.0 нм, амплитуда калибровочного сигнала S_k соответствует полю 0.0471 Тл. Действительно, записи калибровки приобрели вид практически прямых линий, на которые налагаются лишь электронные шумы. Запись 1 (рис. 4) сделана при выключенном модуляторе и определяет положение «нулевого» уровня, а запись 2 — полностью в рабочих условиях с введенной в пучок калибровочной насадкой. Не комментируя подробно этот рисунок, отметим лишь, что новая калибровка существенно упростила обработку записей наблюдений.

Если повнимательней рассмотреть записи 1 и 2 на рис. 4, то видно, что шумы на них несколько различаются: на второй записи они приблизительно в 1.5 раза больше. Обычно записи шумов с выключенным модулятором используются для оценки пороговой чувствительности измерений. Следует признать, что это приводит к завышению такой оценки, и более правильным представляется использовать запись 2 нового способа калибровки, поскольку в данном случае наблюдается практически полное соответствие рабочим условиям.

В заключение следует отметить, что практика использования нового способа калибровки на СТОП выявила и другие преимущества, новая калибровка стала обычной процедурой при выполнении на этом телескопе наблюдений общего магнитного поля и дифференциальных лучевых скоростей.

1. Григорьев В. М., Демидов М. Л. Способ измерения относительных лучевых скоростей разного пространственного масштаба // Исслед. по геомагнетизму, аэронавтике и физике Солнца.— 1983.— Вып. 65.— С. 56—61.
2. Григорьев В. М., Демидов М. Л., Кобанов Н. И. А. с. 1245895 (СССР). Способ калибровки измерений напряженности магнитного поля и дифференциальной лучевой скорости // Открытия. Изобретения.— 1986.— № 27.— С. 131.

3. Кобанов Н. И. А. с. 957009 (СССР). Способ измерения дифференциальной лучевой скорости в солнечной атмосфере // Открытия, изобрет. ... — 1982.— № 33.— С. 185.
4. Котов В. А., Северный А. Б., Цап Т. Т. Исследование глобальных колебаний Солнца. I. Метод и инструмент // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.— 1982.—65.— С. 3—34.
5. Котов В. А., Северный А. Б., Цап Т. Т. Исследования глобальных колебаний Солнца. II. Результаты наблюдений в 1974—1980 гг., их анализ и некоторые выводы // Там же.— 1983.—66.— С. 3—71.
6. Никулин Н. С. Некоторые усовершенствования магнитографа Крымской астрофизической обсерватории // Там же.— 1960.—22.— С. 3—8.
7. Никулин Н. С., Северный А. Б., Степанов В. Е. Солнечный магнитограф Крымской астрофизической обсерватории // Там же.— 1958.—19.—С. 3—19.
8. Северный А. Б. Калибровка сигналов магнитного поля солнечного магнитографа // Там же.— 1967.—36.— С. 22—51.
9. Dittmer P. H. Large scale periodic solar velocities: an observational study // Thesis, Stanford Univ. Inst. Plasma Res. Rept.— 1977.— N 686.—205 p.
10. Dival T. L. A study of large-scale solar magnetic and velocity fields // Ibid.— N 724.—111 p.
11. Howard R., Boyden J. E., Brunning D. H. et al. The Mount Wilson magnetograph // Solar Phys.— 1983.—87, N 1.— P. 195—203.
12. Kalinjak A. A., Vassilyeva G. J. On the velocity field distribution in the solar atmosphere // Ibid.— 1971.—16, N 1.— P. 37—39.
13. Kotov V. A., Severny A. B., Tsap T. T. Observations of oscillations of the Sun // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.— 1978.—183, N 1.— P. 61—78.
14. Scherrer P. H. A study of the mean solar magnetic field // Thesis, Stanford Univ. Inst. Plasma Res. Rept.— 1973.— N 554.—151 p.

Сиб. ин-т зем. магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн
Сиб. отд-ния АН СССР, Иркутск

Поступила в редакцию
17.06.86

РЕФЕРАТ ДЕПОНИРОВАННОЙ РУКОПИСИ

УДК 520.2/.8

ОДНОКАНАЛЬНЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ АСТРОНОМИИ / Пантелеев С. К.

(Рукопись деп. в ВИНТИ; № 2060-В87)

В обзоре рассмотрены и систематизированы различные конструкции звездных спектрометров, применяемых в астрономии с 60-х годов по настоящее время. Проведен анализ требований, предъявляемых к этим приборам, оцениваются тенденции их совершенствования. Обсуждаются возможности автоматизации работы астрономических спектрометров с помощью ЭВМ.