

## ЭЛЕКТРОНИКА СОЛНЕЧНЫХ МАГНИТОГРАФОВ ИЗМИРАН

Э. И. Могилевский, И. Д. Гиц, Б. А. Иошпа

Изложен принцип работы нескольких вариантов модуляционных фотоэлектрических солнечных магнитографов, построенных ИЗМИРАН.

Измерение магнитных полей на Солнце имеет огромное значение прежде всего потому, что генерация и выход корпускулярного и электромагнитного излучения, ответственного за спорадическое радиоизлучение Солнца, геомагнитные бури и состояние верхней атмосферы (ионосферы) Земли, определяются в значительной степени магнитными и индуцированными электрическими полями активных областей Солнца. Поэтому проблеме измерений магнитных полей на Солнце уделяется большое внимание.

Даже измерение относительно больших (до 4000 эрстед) магнитных полей пятен требует мощных спектральных солнечных установок и поэтому доступно немногим обсерваториям. Значительно сложнее измерять слабые ( $\sim 0,1 \div 50$  эрстед) локальные поля; например, для измерения магнитного поля в 1 эрстед требуется определить зеемановское расщепление в четыре сотых миллиангстрема, тогда как ширина линии  $\sim 200$  миллиангстрем. Только применение модуляционного фотоэлектрического метода позволяет решить эту задачу.

Идея указанного метода заключается в следующем. Зеемановские компоненты, поляризованные по эллипсу в различных направлениях, в выделенном щелью участке крыла фраунгоферовой линии имеют разную интенсивность. Пропуская на фотокатод с помощью поляризационного светоанализатора то одну, то другую компоненту, получаем модулированный световой поток, по глубине модуляции которого можно судить о величине магнитного поля (рис. 1).

Как показывают расчеты [1, 2], измеренная напряженность магнитного поля по лучу зрения  $H_z$  определяется выражением

$$H_z = \frac{\Phi_{\sim}}{\kappa F(\Delta_i \gamma_i) dJ/d\lambda} = \frac{m}{\kappa F(\Delta_i \gamma_i) d\Phi_{\sim}/d\lambda},$$

где  $\Phi_{\sim}$  — разность световых потоков двух компонент в данном месте контура линии (для линии, имеющей простой эффект Зеемана),  $\kappa$  — параметр, характеризующий величину эффекта Зеемана для данной линии,  $J$  — интенсивность в данной точке контура,  $F(\Delta_i \gamma_i)$  — функция, характеризующая приборную по-

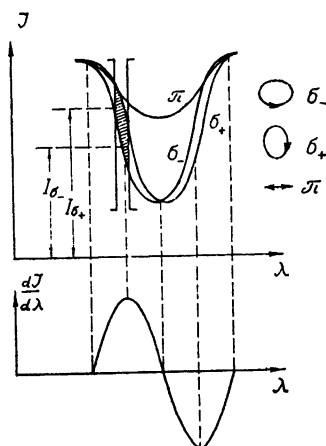


Рис. 1. Принцип действия фотоэлектрического модуляционного магнитографа ( $\sigma_{-}$ ,  $\sigma_{+}$  — две эллиптически поляризованные зеемановские компоненты;  $J_{\sigma-}$ ,  $J_{\sigma+}$  — их интенсивности в крыле контура линии в участке, выделяемом щелью спектрографа;  $\pi$  — линейно-поляризованная зеемановская компонента;  $J$  — интенсивность;  $\lambda$  — длина волны).

ляризацию установки,  $\Phi_{-}$  — средний поток излучения,  $m$  — глубина светомодуляции,  $\lambda$  — длина волны.

Таким образом, измерение  $H_z$  сводится к одновременному измерению  $\Phi_{-}$  и  $dJ/d\lambda$ . Этот принцип измерения магнитного поля был осуществлен в ИЗМИРАН в 1953 г. [1].

В американском магнитографе Бэбкока [3] при применении спектрографа очень большого разрешения осуществлялось измерения одной величины глубины модуляции одновременно в двух крыльях фраунгоферовой линии. Этот принцип с некоторыми дополнениями применен в магнитографах Крымской и Пулковской обсерваторий [4, 8]. При таком методе наблюдений почти полностью исключается приборная поляризация и улучшается отношение сигнала к шуму в измерителе. Однако метод вычитания сигналов, полученных в двух крыльях, приводит к существенным ошибкам. Дело в том, что, как показывают расчеты [5], контур фраунгоферовых линий, в котором ведутся измерения, несимметричен, если, например, имеется градиент магнитного поля. В солнечной атмосфере такие условия с необходимостью существуют в любом месте измерений. Поэтому разностный сигнал в крыльях линии будет иметь ошибку, являющуюся функцией места наблюдения на Солнце.

Другая существенная ошибка в американском методе наблюдений возникает из-за того, что не производится одновременно с измерением  $\Phi_{-}$  (или  $m$ ) также измерение  $dJ/d\lambda$  (или  $d\Phi_{-}/d\lambda$ ), что необходимо, так как при измерении магнитного поля в различных местах на Солнце средняя интенсивность  $J$  и крутизна линий различны. Они меняются при переходе, например, от невозмущенного места на Солнце к флок-кулу и т. д.

Значительные ошибки, превышающие часто измеряемую величину поля, возникают из-за того, что локальные движения газов солнечной атмосферы, где образуются измеряемые фраунгоферовы линии, дают переменное доплерово смещение контура линии по выходной щели спектрографа. В магнитографе КраО [4] сделана попытка компенсировать доплеровский сдвиг; однако такая компенсация при несимметричном контуре фраунгоферовой линии и одновременном наблюдении в двух крыльях может приводить к еще большим ошибкам в измерении  $H$ .

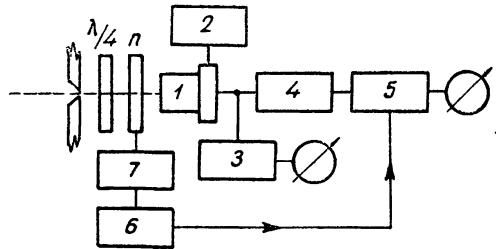
Из сказанного следует, что электронная часть магнитографа должна быть сделана не только так, чтобы получать устойчивое и надежное усиление сигнала  $\Phi_{-}$ , но исключать доплеровский сдвиг, несимметрию контура и его изменения в различных местах на Солнце. При разработке макетов электронной части магнитографа ИЗМИРАН делались попытки найти решение этих задач.

После постройки в ИЗМИРАН первого магнитографа с механическим светомодулятором и измерителем на 33  $\mu$  (СМ-1, см. блок-схему рис. 2) для повышения чувствительности и улучшения отношения сигнала к шуму следовало определить спектр шумов фотоэлектронного умножителя и выбрать наиболее выгодную частоту модуляции. Как показали проведенные измерения, выгодно было повысить частоту модуляции ( $f \geq 200 \mu$ ). Модуляция светового потока на такой частоте могла быть осуществлена не механическими, а электрооптическими светомодуляторами, имеющими ряд существенных преимуществ [7]. Это позволило изготовить установку, в которой использовалась ячейка Керра в качестве светомодулятора при частоте модуляций 225  $\mu$  (СМ-2 блок-схема на рис. 3), и установку, в которой использовался кристаллический светомодулятор при той же частоте модуляции (СМ-2А). По выходе из спектрографа световой поток проходит через ячейку

Керра или кристалл, модулируется и попадает на фотоумножитель. Фотоумножитель соединен с высокочувствительным автоматическим регистратором (ЭППВ-51), измеряющим постоянную составляющую сигнала, и измерителем, на который подается переменная составляющая. Измеритель состоит из предусилителя, узкополосного усилителя на  $T$ -образных  $RC$ -мостиках с полосой пропускания  $\Delta f = 5$  гц и фазового детектора. Синхронизирующее напряжение на фазовый детектор подается от того же звукового генератора, который питает ячейку Керра. В качестве выходного регистрирующего прибора использовался электронный потенциометр.

Рис. 2. Блок-схема магнитографа с механическим светомодулятором;

1 — фотоумножитель; 2 — блок питания фотоумножителя; 3 — усилитель постоянного тока; 4 — усилитель ( $f = 33$  гц,  $\Delta f = 3$  гц), 5 — фазовый детектор; 6 — генератор; 7 — мотор,  $\lambda/4$  — пластинка в четверть волны; П — поляризатор.



Повышение чувствительности магнитографа возможно путем одновременного измерения магнитного поля в одной или нескольких парах соответствующих линий Фраунгофера. Применение асинхронного накопителя [6], т. е. суммирование сигналов по двум каналам измерения от независимых фотоумножителей, может дать заметное улучшение отношения сигнала к шуму. Построенный такого рода двухканальный измеритель магнитографа на частоту 225 гц оказался громоздким и сложным и не получил дальнейшего развития.

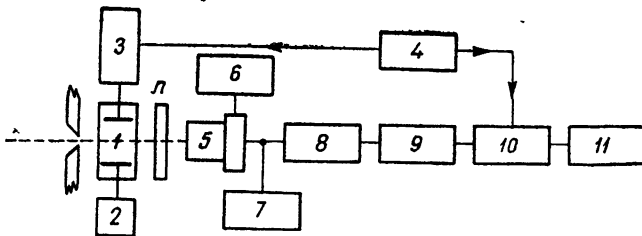


Рис. 3. Блок-схема магнитографа с электрооптическим светомодулятором:

1 — ячейка Керра; 2 — источник постоянного напряжения, 3 — трансформаторный усилитель; 4 — звуковой генератор; 5 — фотоумножитель; 6 — блок питания фотоумножителя; 7 — регистратор  $\Phi_{\Sigma}$ ; 8 — предусилитель; 9 — усилитель ( $f = 225$  гц,  $\Delta f = 5$  гц); 10 — фазовый детектор; 11 — регистратор  $\Phi_{\sim}$ ; П — поляризатор.

Значительно более перспективным с точки зрения улучшения отношения сигнал/шум является измеритель магнитографа, работающий по нулевому принципу. Сигнал, подаваемый на измерительное устройство, компенсируется до нуля. Как известно, флюктуации на выходе любого усилительного устройства складываются из флюктуаций шумов на входе и флюктуаций коэффициента усиления. Последние устраняются применением нулевого метода. В нашем случае усилительное устройство представляет собой фотоумножитель и узкополосный усилитель, причем определяющую роль играют шумы фотоумножителя. Блок-схема установки, использующей нулевой метод, представлена на рис. 4. После выходной щели спектрографа стоит пластинка

$\lambda/4$  и призма Волластона. Пластинка  $\lambda/4$  превращает эллиптически поляризованные компоненты в две взаимно-перпендикулярные линейно-поляризованные составляющие, а призма Волластона разносит в пространстве эти две компоненты, так что они идут по разным оптическим трактам. На пути большей по интенсивности компоненты стоит компенсирующее устройство — ячейка Керра и поляризатор. При подаче на ячейку некоторого постоянного напряжения интенсивность пропущенного света уменьшается. Обе компоненты уравниваются, и на выходе переменный сигнал равен нулю. Мерой магнитного поля является напряжение на компенсирующей ячейке. Можно сделать нулевой метод автоматическим, введя обратную связь, т. е. для компенсации использовать выходной сигнал.

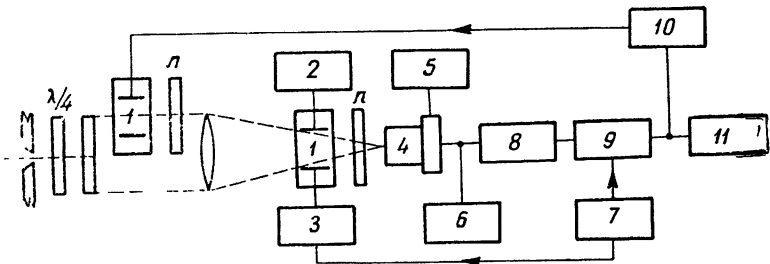


Рис. 4. Блок-схема магнитографа, использующего нулевой метод

- 1 — ячейка Керра; 2 — источник постоянного напряжения; 3 — трансформаторный усилитель; 4 — фотоумножитель; 5 — блок питания фотоумножителя; 6 — регистратор  $\Phi$ ; 7 — звуковой генератор; 8 — усилитель ( $f = 225$  гц,  $\Delta f = 5$  гц); 9 — фазовый детектор; 10 — блок обратной связи; 11 — регистратор  $\Phi$ ;  $\Pi$  — поляризатор;  $\lambda/4$  — пластинка в четверть волны

В американском магнитографе сделано одно очень грубое допущение: форма контура фраунгоферовой линии принимается за треугольник. В этом случае безразлично, где на контуре располагать выходную щель монохроматора. Проведенные измерения магнитного эффекта вдоль всего контура показали, что такого рода допущение неоправдано. Сложность контура линии существенно влияет на измерения магнитного поля (особенно для малых полей), так как глубина модуляции света составляет только проценты (или доли процента).

Для получения истинного значения поля необходимо обеспечить во время наблюдений строгое постоянство положения выходной щели на контуре линии (желательно в области, где  $dJ/d\lambda$  имеет максимум), что крайне трудно выполнить практически. Поэтому была применена система вынужденного качания контура линии по щели. Очевидно, что при этом щель всегда будет проходить через точку контура с максимальным значением величины  $dJ/d\lambda$ . Заставляя линию качаться относительно щели при помощи поворота плоско-параллельной пластинки, мы получаем сигнал, модулированный с частотой качания. Очевидно, что пока щель находится на линейном участке контура, где  $dJ/d\lambda$  максимально, сигнал не меняется. Как только контур линии сместился и на щель попадает нелинейный участок контура линии, появляется модуляция сигнала с частотой качания. Глубина модуляции сигнала служит мерой смещения линии. Усиленный сигнал после детектирования подается на блок обратной связи. Поворот второй плоско-параллельной пластинки блока обратной связи возвращает линию в положение, когда выходная щель вырезает линейный участок контура линии. Блок-схема установки дана на рис. 5. Перед входной щелью монохроматора высокого разрешения устанавливается

кристаллооптический светомодулятор (кристалл фосфата аммония, работающий на частоте 500 гц, и поляроид—призма Франка—Риттера), а также компенсатор приборной поляризации. Перед выходной щелью ставится плоско-параллельная пластинка блока обратной связи и пластинка, качающая спектр с частотой 16,5 герц. Сигнал с фотоумножителя поступает на измеритель среднего светового потока и на предусилитель. С последнего сигнал подается на два усилителя, настроенных на частоту 500 гц с полосой пропускания в 80 и 20 гц. Детектированный фазовым детектором сигнал узкополосного (20 гц) усилителя является индикатором магнитного поля (по величине и знаку). Сигнал с выхода усилителя с полосой в 80 гц после первого детектора поступает на усилитель второй частоты модуляции (33 гц,  $\Delta f = 3$  гц), а затем после фазового детектора на блок обратной связи. Такой метод измерения магнитного поля учитывает контур измеряемой линии и его возможные изменения во время измерения. Испытанный макет такого магнитографа, устанавливаемый на башенном солнечном телескопе АТБ-3 ИЗМИРАН, должен обеспечить уверенные измерения распределения локальных магнитных полей на Солнце.

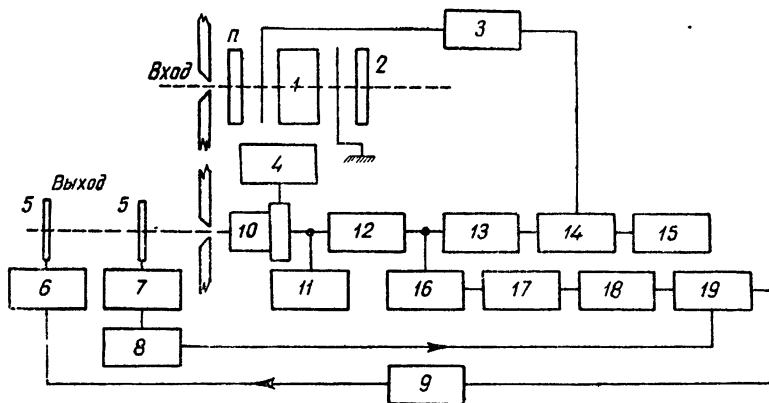


Рис. 5 Блок-схема двухмодуляционного магнитографа:

1—кристалл-модулятор, 2—светофильтр-компенсатор приборной поляризации, 3—блок питания модулятора; 4—блок питания фотоумножителя; 5—пластинка; 6—мотор, 7—качающее устройство, 8—звуковой генератор; 9—блок обратной связи; 10—фотоумножитель; 11—регистратор  $\Phi_{\sim}$ ; 12—предусилитель; 13—усилитель ( $f = 500$  гц,  $\Delta f = 20$  гц); 14—фазовый детектор; 15—регистратор  $\Phi_{\sim}$ ; 16—усилитель ( $f = 500$  гц,  $\Delta f = 80$  гц); 17—детектор; 18—усилитель ( $f = 33$  гц,  $\Delta f = 3$  гц); 19—фазовый детектор, П — поляроид

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Э. И. Могилевский, А. Е. Веллер, В. М. Вальд-Перлов, ДАН СССР, 95, 957 (1954).
2. А. Е. Веллер, Труды НИИЗМ, вып. 11 (21), 162 (1955).
3. Н. W. Vabsock, *Astroph. J.*, 118, 387 (1953).
4. Н. С. Никулин, А. Б. Северный, В. Е. Степанов, Изв. Крымской астрофизической обсерватории, 19, 3 (1958).
5. W. Mattig, *Zs. Astroph.*, 44, 280 (1958).
6. А. А. Харкевич, *Радиотехника*, 8, 3 (1953).
7. И. А. Жулин, Изв. высш. уч. зав. — *Радиофизика*, 3 (1960).
8. Л. М. Котляр, *Астрон. цирк.*, № 203, 5 (1959).