

## ИЗМЕРЕНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ, ВНОСИМОЙ КАТАДИОПТРИЧЕСКИМ ОБЪЕКТИВОМ

© 2013 г. А. П. Савикин\*, канд. физ.-мат. наук; А. М. Шутов\*\*, доктор техн. наук.

\* Нижегородский государственный университет, г. Нижний Новгород

\*\* Нижегородский государственный педагогический университет, г. Нижний Новгород

E-mail: savikin@rf.unn.ru; shutovam@gmail.ru

Приведены результаты стендовых измерений инструментальной поляризации объектива МС 3М – 5 СА. Аналогичную методику измерений и использованные поляризационно-оптические изделия в дальнейшем предлагается применить для измерения инструментальной поляризации БТА САО РАН.

**Ключевые слова:** инструментальная поляризация, измерение параметров Стокса, анализ структуры магнитных полей.

Коды OSIC: 120.5410, 110.5405.

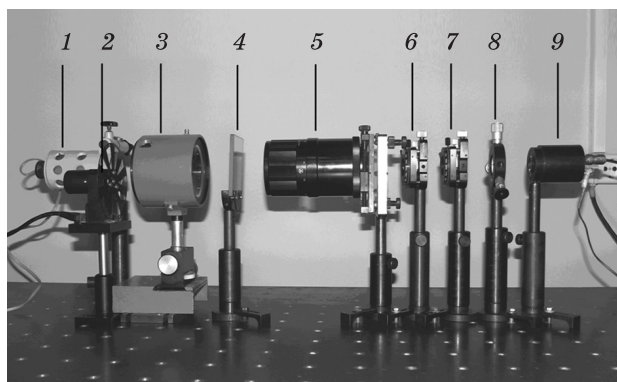
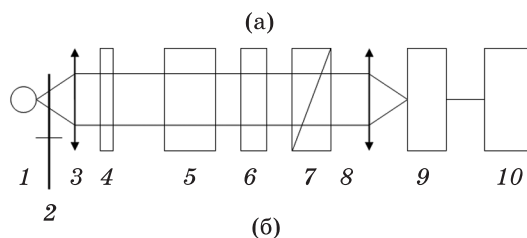
Поступила в редакцию 19.03.2013.

Поляриметрические исследования в астрофизике являются высокоэффективным средством исследования самых различных по своей природе объектов [1–5]. При этом используются разнообразные телескопические устройства: диоптрические – линзовые, катоптрические – зеркальные и катадиоптрические – зеркально-линзовые. Стремление к исследованию слабых и удаленных объектов привело в последние годы к совершенствованию как самих телескопических систем, так и комплекса вспомогательных аппаратных оптических устройств и фотоприемников. Вместе с тем, заранее предполагая, что сложные многоэлементные адаптивные телескопические системы с большим световым диаметром обладают значительной инструментальной поляризацией<sup>1</sup>, и имея в виду сложность измерений малых значений четвертого параметра Стокса, многие астрономы-исследователи к настоящему времени значительно утратили интерес к астрополяриметрии.

В связи с этим при проведении прецизионных астрополяриметрических исследований с использованием разнообразных телескопических систем для получения достоверных результатов возникает необходимость измерения инструментальной поляризации самой телескопической системы. В качестве примера были проведены стендовые измерения инструментальной поляризации ката-

диоптрического объектива МС 3М – 5 СА (8/500, диаметр 60 мм), собранного по схеме Максутава. Аналогичную методику измерений в дальнейшем предлагается применить для измерения инструментальной поляризации БТА САО РАН.

На рисунке приведены оптическая схема, с помощью которой осуществлялись измерения инструментальной поляризации объектива и размещение элементов измерительной установки на оптической плите.



Оптическая схема измерения (а) и размещение измерительной установки на оптической плите (б). Пояснения в тексте.

<sup>1</sup> Под термином “инструментальная поляризация” понимается изменение поляризации излучения, вносимое объективом.

В состав установки входят следующие оптические элементы:

1 – источник излучения (галогенная лампа, 25 Вт, 12В);

2 – прерыватель (optical chopper MC 1000 А, с регулируемой частотой модуляции  $f$ , в эксперименте  $f = 232$  Гц);

3 – конденсор, образованный двумя линзами (фокусное расстояние конденсора 50 мм, диаметр 60 мм);

4 – светофильтр СЗС 14 (спектр пропускания от 300 до 750 нм);

5 – объектив MC 3M – 5 CA (8/500, диаметр 60 мм), собранный по схеме Максудова;

6 – четвертьволновая ахроматическая фазовая пластинка (спектральный диапазон 400 – 600 нм);

7 – поляризационная призма-анализатор;

8 – линза, фокусирующая излучение на фотоприемник (фокусное расстояние 100 мм, диаметр 50 мм);

9 – фотодиод ФД 24К;

10 – синхронный детектор модель SR 810.

### Методика определения параметров Стокса

Методика экспериментального определения параметров Стокса для произвольного луча приведена в [6]. Измерения инструментальной поляризации объектива проводились в описанной далее последовательности.

#### 1. Измерение параметров Стокса источника излучения

Результаты измерений при различных азимутальных положениях ( $\Theta$ ) анализатора и фазовой пластинки приведены в табл. 1.

В таблице приняты следующие обозначения:

$U$  – напряжение на нагрузке фотодиода 9 (см. рисунок);

$U_{\text{средн}} = [U(\Theta) + U(\Theta + 180^\circ)]/2$  – среднее значение напряжений на нагрузке фотодиода при двух азимутальных положениях анализатора – ( $\Theta$ ) и ( $\Theta + 180^\circ$ );

$\Sigma$  – суммарное значение напряжения при ортогональных ориентациях анализатора 7.

При этом:

$$\begin{aligned} I_x + I_y &= 4695, \\ I_x - I_y &= 105, \\ I_{45} - I_{-45} &= 65, \\ I_{45 + \lambda/4} - I_{-45 + \lambda/4} &= 47, \end{aligned}$$

где  $I_x$  – интенсивность излучения, прошедшего через анализатор 7 (см. рисунок), плоскость пропускания которого параллельна горизонтальной плоскости; она пропорциональна напряжению на нагрузке фотодиода 9  $U_{\text{средн}}(\Theta = 0^\circ)$ ;

$I_y$  – интенсивность излучения, пропорциональная напряжению  $U_{\text{средн}}(\Theta = 90^\circ)$ ;

$I_{45}$  – интенсивность излучения, пропорциональная напряжению  $U_{\text{средн}}(\Theta = +45^\circ)$ , когда плоскость пропускания анализатора 7 составляет угол  $45^\circ$  с горизонталью и проходит через первый и третий квадраты (согласно [6]);

$I_{-45}$  – интенсивность излучения, прошедшего через анализатор 7, плоскость пропускания которого также образует угол  $45^\circ$  с горизонталью, но проходит через второй и четвертый квадраты;

$I_{45 + \lambda/4} - I_{-45 + \lambda/4}$  – интенсивность излучения, прошедшего через четвертьволновую пластинку 6 и анализатор 7, ориентированный так же, как в третьем и четвертом случаях соответственно.

Нормированные значения параметров Стокса:

$$\begin{aligned} S_1 &= 1, \\ S_2 &= 0,022, \\ S_3 &= 0,014, \\ S_4 &= 0,010, \end{aligned}$$

Таблица 1. Зависимость  $U(\Theta)$  при измерении параметров Стокса источника излучения

$\Theta$ , град	0	90	+45	-45	-45 + $\lambda/4$	+45 + $\lambda/4$
$U$ , мВ	2410	2410	2500	2310	2087	2270
$U$ , мВ ( $\Theta + 180^\circ$ )	2390	2180	2300	2360	2120	2080
$U_{\text{средн}}$ , мВ	2400	2295	2400	2335	2103	2150
$\Sigma$ , мВ	4695		4735		4253	

Таблица 2. Зависимость  $U$  ( $\Theta$ ) при измерении параметров Стокса объектива

$\Theta$ , град	0	90	+45	-45	$-45 + \lambda/4$	$+45 + \lambda/4$
$U$ , мВ	2415	2405	2480	2350	2085	2240
$U$ , мВ ( $\Theta + 180^\circ$ )	2380	2180	2320	2380	2135	2075
$U_{\text{средн}}$ , мВ	2398	2293	2400	2365	2110	2158
$\Sigma$ , мВ	4691		4765		4268	

где  $S_1 = I_x + I_y$  – первый параметр Стокса, представляющий собой полную интенсивность излучения;

$S_2 = I_x - I_y$  – второй параметр Стокса – разность интенсивностей ортогонально поляризованных компонентов;

$S_3 = I_{45} - I_{-45}$  – третий параметр Стокса – разность интенсивностей линейно поляризованных компонентов, измеренных в линейном базисе, положение которого отличается на угол  $45^\circ$  от положения линейного базиса, определяющего два первых параметра;

$S_4 = I_{45 + \lambda/4} - I_{-45 + \lambda/4}$  – четвертый параметр Стокса, представляющий собой разность интенсивностей двух противоположно циркулярно поляризованных компонентов излучения [7].

## 2. Измерение параметров Стокса объектива

Результаты измерений при различных азимутальных положениях анализатора и фазовой пластинки приведены в табл. 2.

При этом:

$$\begin{aligned} I_x + I_y &= 4691, \\ I_x - I_y &= 105, \\ I_{45} - I_{-45} &= 35, \\ I_{45 + \lambda/4} - I_{-45 + \lambda/4} &= 48. \end{aligned}$$

На основании полученных данных (табл. 1 и 2) можно рассчитать коэффициент поглощения излучения в объективе:

$$\eta = 4695 - 4691 / 4695 = 0,00085.$$

Параметры Стокса имеют размерность интенсивности излучения. Поглощение излучения в объективе аналогично процессу деполяризации прошедшего излучения и одинаково уменьшает все параметры Стокса.

Поэтому при нахождении нормированных значений параметров Стокса излучения, прошедшего через объектив, а затем инструменталь-

ной поляризации необходимо внести добавочные, положительные поправки в интенсивность излучения, прошедшего через объектив, и нормировать параметры излучения на первоначальную интенсивность по уровню 4695 мВ.

Это позволит при нахождении инструментальной поляризации воспользоваться аддитивностью нормированных параметров Стокса.

При этом нормированные значения параметров Стокса определяются как

$$\begin{aligned} S_1 &= 1, \\ S_2 &= 0,023, \\ S_3 &= 0,008, \\ S_4 &= 0,011. \end{aligned}$$

Таким образом, инструментальная поляризация катодиоптрического объектива составит в значениях параметров Стокса:

$$\begin{aligned} \Delta S_2 &= 0,001, \\ \Delta S_3 &= 0,006, \\ \Delta S_4 &= 0,001. \end{aligned}$$

Соответственно степень инструментальной поляризации в относительных единицах можно определить как

$$P = \sqrt{(\Delta S_2)^2 + (\Delta S_3)^2 + (\Delta S_4)^2} = 0,006.$$

При проведенных измерениях точность измерения параметров Стокса  $S_1$  и  $S_2$  оказалась не хуже  $\pm 0,5\%$ , точность измерения параметров Стокса  $S_3$  и  $S_4$  определялась точностью ориентации фазовых пластинок. В нашем эксперименте точность угловой ориентации фазовых пластинок составляла  $\pm 0,5^\circ$  (угловых градуса), что привело к погрешности измерения параметров Стокса  $S_3$  и  $S_4$  не хуже  $\pm 2\%$ .

С учетом инструментальной поляризации объектива вектор Стокса исследуемого объекта будет иметь следующий вид:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 \\ S_2 - \Delta S_2 \\ S_3 - \Delta S_3 \\ S_4 - \Delta S_4 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Некоторые устройства для поверки и настройки стокс-поляриметров наземного базирования описаны в [7].

Для телескопических систем при проведении астрофизических исследований удобно использовать источник космического базирования, установив перед устройством измерения инструментальной поляризации деполяризатор.

Так, например, для БТА САО РАН перед комплексом светоанализирующей аппаратуры в прямом фокусе телескопа или в фокусе Несмита устанавливаются деполяризатор и устройство измерения инструментальной поляризации. В результате нормированный вектор Стокса для полностью неполяризованного света после деполяризатора будет иметь следующий вид:

После вывода деполяризатора, при нулевой поляризации источника космического базирования, нормированный вектор Стокса для собственной инструментальной поляризации БТА будет иметь вид:

$$\mathbf{S}' = \begin{bmatrix} 1 \\ \Delta S_2 \\ \Delta S_3 \\ \Delta S_4 \end{bmatrix}.$$

Здесь под  $\Delta S_2$ ,  $\Delta S_3$  и  $\Delta S_4$  имеются в виду значения второго, третьего и четвертого параметров Стокса, определяющих инструментальную поляризацию БТА.

Полученные результаты могут иметь особенное значение при измерении параметров Стокса в узких спектральных линиях для последующего анализа структуры магнитных полей исследуемых астрообъектов.

\* \* \* \* \*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Stokes R.A., Swedlund J.B., Avery R.W., Michalsky J.J.* Interstellar circular polarization: results from a survey of 84 stars // *Astron. J.* 1974. V. 79. N 6. P. 678–681.
2. *Coffen D.L.* Optical polarization measurements of the Jupiter atmosphere at 103° phase angle // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79. N 25. P. 3645–3652.
3. *Daniel J.V.* Monte Carlo analysis of polarization by Thomson scattering in circum stellar envelopes // *Astron. and Astrophys.* 1980. V. 86. N 1–2. P. 198–203.
4. *Dollfus A.* Optical polarimetry of the Galilean Satellites of Jupiter // *Icarus.* 1975. V. 25. N 3. P. 416–431.
5. *Dollfus A., Deschamps M., Ksanfomaliti L.V.* The surface texture of the martian sell photopolarimeters // *Astron. and Astrophys.* 1983. V. 123. N 2. P. 225–237.
6. *Джеррард А.М., Берч Д.М.* Введение в матричную оптику. М.: Мир, 1978. С. 214–216
7. *Шутов А.М.* Методы оптической астрополяриметрии. М.: УРСС, 2007. 232 с.