

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПАНОРАМНОГО СТОКС-ПОЛЯРИМЕТРА ДЛЯ МАЛЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

© 2013 г. **И. И. Синявский**, канд. техн. наук; **Ю. С. Иванов**;
А. П. Видьмаченко, доктор физ.-мат. наук

* Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев

E-mail: syn@mao.kiev.ua

В статье предложена концепция построения изображающего поляриметра на основе поляризационных пленок для измерения линейной поляризации изображений протяженных и точечных небесных объектов. Спектральный диапазон работы прибора 420–850 нм, угол поля зрения $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Прибор предназначается для оснащения телескопов с диаметром главного зеркала до 1 м и относительным отверстием $f/12$. Проанализированы недостатки и преимущества предложенного прибора.

Ключевые слова: поляризация, изображающий стокс-поляриметр.

Коды OSIC: 120.5410, 110.5405.

Поступила в редакцию 15.08.2012.

Введение

Поляриметрические наблюдения являются актуальными для астрофизики и позволяют определять пространственную структуру вещества, магнитных полей, космической пыли [1]. Указанные измерения также дают возможность определять значения комплексного показателя преломления аэрозольных частиц, распределение их по размерам, относительное содержание аэрозоля, а также изучать механизмы, обеспечивающие корреляцию изменений свойств атмосферы планет с солнечной активностью [2]. Поляризацию световой волны можно описать параметрами, известными как компоненты вектора Стокса [3]. Авторами в [4, 5] предложена концепция построения астрономического спектрополяриметра, согласно которой был разработан прибор, используемый в Главной астрономической обсерватории (ГАО) НАН Украины. Поляризация анализируется модуляционным методом, который заключается в преобразовании ее вращающейся фазовой пластинкой в интенсивность лучей ортогональной поляризации. Величина и фаза изменений интенсивности несут информацию о компонентах вектора Стокса. Однако при наблюдениях быстропротекающих плохо локализованных объектов (например Gamma-ray burst) необходимо проводить измерения одновременно на большом поле

зрения. Такие задачи могут решать изображающие поляриметры. В ГАО НАН Украины разрабатывается изображающий спектрополяриметр для малого телескопа Celestron, позволяющий измерять три параметра вектора Стокса одновременно.

1. Определение параметров Стокса

Поляризация световой волны может быть полностью описана четырьмя параметрами Стокса: S_0, S_1, S_2, S_3 , где S_0 – световой поток, а три других параметра описывают состояние поляризации. Указанные параметры могут быть получены измерением шести интенсивностей:

$$\begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} + I_{-45} \\ I_r + I_l \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $I_0, I_{90}, I_{45}, I_{-45}, I_r, I_l$ – соответственно интенсивности излучения с вертикальной и горизонтальной поляризациями, поляризациями с углами 45° и -45° , а также право- и левоциркулярной поляризацией, измеренные непосредственно фотометрическим методом. Интенсивности $I_0, I_{90}, I_{45}, I_{-45}$ могут быть измерены с помощью линейно поляризующих элементов,

а I_r и I_l – с помощью четвертьволновой фазовой пластинки и линейного поляризатора.

Угол наклона большой оси эллипса поляризации по отношению к оси X вычисляется как

$$\psi = \frac{1}{2} \arctg \frac{S_2}{S_1}. \quad (2)$$

Степень линейной поляризации определится как

$$P_{lin} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2} / S_0, \quad (3)$$

степень круговой поляризации – как

$$P_{lin} = S_3 / S_0, \quad (4)$$

общая степень поляризации – как

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}. \quad (5)$$

2. Концепции построения стокс-поляриметров

Существует несколько вариантов построения астрономических поляриметров, которые можно разделить по методу получения информации на поляриметры, основанные на

- делении излучения, падающего на вход прибора, по амплитуде, с применением вращающегося поляризационного элемента;
- делении излучения, падающего на вход прибора, по амплитуде без вращающихся элементов;
- пространственном разделении излучения, падающего на вход прибора, по апертуре.

Классическая схема поляриметра первого типа – вращающаяся фазовая пластинка и поляризатор (как правило, двулучерасщепляющий элемент – призма Волластона, разводящая излучение на два пучка с ортогональными составляющими). Особенности поляриметров, основанных на таком методе, хорошо описаны в работах [6–8].

Анализ поляризации в таких поляриметрах проводится модуляционным методом, который заключается в преобразовании ее вращающейся фазовой пластинкой и поляризатором в интенсивности лучей ортогональной поляризации. Величина и фаза изменений интенсивно-

стей несет информацию о компонентах вектора Стокса. Известно, что эффективность такого преобразования определяется как

$$E_n = \cos^2(d - d_0), \quad (6)$$

где E_n – коэффициент преобразования, d – фазовый сдвиг, вносимый фазовой пластинкой; d_0 – номинальный фазовый сдвиг, соответствующий $E_n = E_{max}$.

Для излучения с линейной поляризацией эффективность будет максимальной при $d_0 = \pi/2$, а для круговой поляризации – при $d_0 = \pi/4$. Для анализа излучения произвольной поляризации необходим компромиссный вариант $d_0 = 126,52^\circ$ ($E_{max} = 0,71$) [9] или раздельное использование полуволновой и/или четвертьволновой фазовой пластинки ($E_n > 0,9$). Очевидно, высокоэффективный прибор должен иметь пластинку с малым значением $d - d_0$ во всем спектральном диапазоне. Такие параметры имеют суперхроматические фазовые пластинки, предложенные и разработанные В. Кучеровым [10, 11]. Они обеспечивают постоянство фазового сдвига в широком спектральном диапазоне.

Этот метод анализа поляризации позволяет проводить измерения с погрешностью до 0,01% таких астрономических объектов, поляризация излучения которых изменяется во времени медленно или имеет определенный период (например излучение пульсаров). Но наблюдения случайных явлений, таких как гигантские радиоэмиссии [12] или вращающиеся радиотранзиентные эмиссии [13], являются достаточно трудной проблемой поляриметрии.

В работе [14] описана схема построения фотополяриметра, позволяющего измерять четыре параметра вектора Стокса одновременно. Это достигается путем разделения входящего излучения светоделителем со специальным покрытием, расположенным до призмы Волластона, что позволяет разделять излучение на компоненты линейной и круговой поляризации. В результате интенсивности четырех выходящих лучей изображающего поляриметра определяются как $I = AS$, где I – вектор интенсивности, A – матрица системы, S – падающий вектор Стокса, который может быть восстановлен из $S = IA^{-1}$. По такому принципу строятся поляриметры второго типа.

Изображающий поляриметр с использованием 4 отдельных приемников излучения для видимого диапазона спектра позволяет проводить измерения с частотой 60 кадр/с [15].

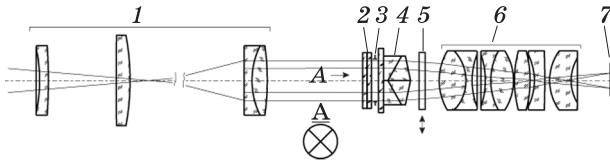


Рис. 1. Оптическая схема стокс-поляриметра. 1 – коллиматор, 2 – набор поляризаторов, а также фильтры или дифракционная решетка, 3 – плоскость выходного зрачка, 4 – система клиньев для разведения изображений, 5 – камерный объектив, 6 – приемник изображения, 7 – плоскость приемника изображений, А – вид на зрачок с установленными по секторам четырьмя поляроидными пленками.

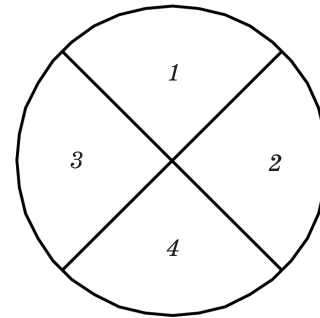


Рис. 2. Анализатор стокс-поляриметра. Ориентация поляризационного элемента: 1 – 0°, 2 – 90°, 3 – 45°, 4 – 135°.

В оптической системе использованы три поляризационных светоделителя, два из которых – с фазовыми пластинками $\lambda/2$ и $\lambda/4$, что позволяет измерять все параметры Стокса.

Более компактная конструкция, предполагающая использование одного приемника излучения, предлагается в [16]. Анализатор поляризации в своем составе имеет три поляризационных кубика (один из которых дает частичную поляризацию), две фазовые пластинки $\lambda/2$, $\lambda/4$ и четыре компенсационных блока. Конструкция поляриметра позволяет применять его с телескопами с относительным отверстием $f/10$.

В национальном университете Ирландии разработан высокоскоростной изображающий стокс-поляриметр (Galway Astronomical Stokes Polarimeter – GASP) для исследования быстрых (10^{-6} с) вариаций в астрономических объектах [17]. Поляриметр не имеет перемещающихся и вращающихся частей, все параметры вектора Стокса могут быть измерены за одну экспозицию. GASP использует модифицированный ромб Френеля, который действует как ахроматическая фазовая пластина и одновременно как полупрозрачный светоделитель. Однако указанный поляриметр по принципу построения оптической схемы не может обладать большой светосилой, имеет малое поле зрения и пригоден для наблюдения одиночных небесных объектов с высокой точностью.

Третий тип поляриметров основан на делении апертуры. Схемы построения таких поляриметров приведены в работах [18, 19]. Авторы, на наш взгляд, не делают четкого различия между вариантами построения поляриметров указанного типа.

Под делением апертуры мы будем понимать пространственное (как правило, секторное) деление выходного зрачка оптической системы,

вблизи которого устанавливаются элементы, анализирующие характеристики излучения.

3. Оптическая система

В настоящей статье предложена концепция построения оптической системы стокс-поляриметра, позволяющего проводить измерения компонентов вектора Стокса одновременно, в широком поле и без ограничений по относительному отверстию системы. Предлагаемая схема позволяет измерять все компоненты путем введения в секторы зрачка пластин $\lambda/2$ и $\lambda/4$, но по специфике поставленных задач регистрация четвертого компонента вектора Стокса не проводится.

Оптическая система прибора состоит из коллиматора, составного поляризационного элемента, системы разведения изображений, камерного объектива и приемника изображений, а также сменных фильтров или дифракционной решетки.

На рис.1. показана оптическая схема стокс-поляриметра.

Коллиматор

Коллиматор прибора рассчитан таким образом, что помимо выполнения своей основной функции, он строит исправленное изображение входного зрачка, а также исправляет полевые aberrации телескопа. Поскольку операции в выходном зрачке идентичны операциям во входном зрачке (т.е. на главном зеркале телескопа), такой прием четко разделяет по функциям зрачки и люки системы. Оперирование полученными разделенными переменными позволяет упростить систему и облегчить ее расчет.

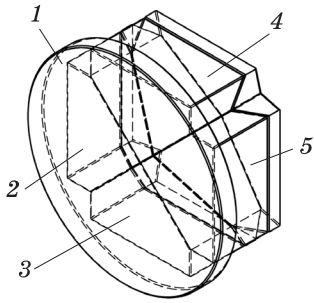


Рис. 3. Система разведения изображений. 1 – подложка, 2–5 – пары ахроматических клиньев для каждого из четырех каналов.

Поляризатор

Согласно (1) для анализа линейной поляризации необходимо выполнить три измерения интенсивностей излучения, прошедшего через линейные поляризаторы. Для более полного использования площади ПЗС-матрицы, а также для повышения точности измерений в описываемом приборе установлены четыре пленочных поляризатора с позиционными углами 0° , 45° , 90° , 135° . Схема такого мозаичного поляризатора, установленного вблизи зрачка телескопа, представлена на рис. 2.

В общем случае возможны различные варианты реализации таких модуляторов. Первый из них – применение пары двулучевых поляризационных призм [20], оптические оси которых развернуты под углом 45° , заполняющих секторы 1–2 и 3–4 соответственно и имеющих эффективность, близкую к 100%. Такая призма (Wedged double Wollaston) была предложена в работе [21]. Однако собственная дисперсия призм требует введения дополнительных компенсационных клиньев и все-таки не может дать качественное изображение в большом поле зрения и широком спектральном диапазоне. Следует отметить, что дисперсия призмы различна для двух ортогональных направлений распространения света, что приводит к неидентичности изображений.

В другом варианте такого поляризатора используются тонкие поляризационные пленки. По сравнению с двулучепреломляющими призмами пленки проигрывают по пропусканию (коэффициент пропускания $\tau \leq 47\%$ в диапазоне 420–800 нм). Однако при широком поле зрения, при учете виньетирования косых полевых лучей на границе соприкосновения призм, пленки (благодаря меньшей толщине) выигры-

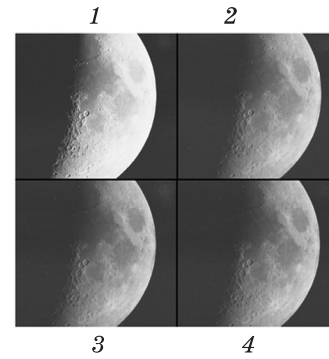


Рис. 4. Укладка четырех изображений на приемнике излучения при разной ориентации поляризационного элемента: 1 – 0° , 2 – 90° , 3 – 45° , 4 – 135° .

вают по сравнению с двулучепреломляющими призмами.

Таким образом, падающий поток разделяется на 4 составляющих (канала), которые необходимо развести в пространстве.

Система разведения изображений

Для разведения четырех изображений наблюдаемых объектов можно использовать четыре пары зеркал, установленных под определенными углами. Такая система не вносит хроматических aberrаций, но громоздка, требует весьма тщательной юстировки и более пригодна для крупных телескопов. В описываемом приборе используется система отклоняющих призм, ахроматизированная для диапазона 420–850 нм. Система состоит из двух склеенных клиньев из стекол ОФ3 и БК10 в каждом канале (рис. 1, рис. 3).

Камерный объектив

Семилинзовый камерный объектив строит изображения исследуемого объекта одновременно в четырех каналах (рис. 4). В диапазоне 420–850 нм для каждой точки в пределах поля зрения $15' \times 15'$ диаметр пятна, в котором концентрируется более 95% энергии, не превышает 32 мкм, что соответствует 2 пикселям матрицы. Максимальное значение дисторсии оптической системы стокс-поляриметра составляет 0,65%.

Расчет системы предусматривает возможность использования сменных фильтров, а также дифракционной решетки 100 штрих/мм, работающей на пропускание. Частота обусловле-

на возможным наложением спектров соседних каналов на приемнике излучения.

Расчеты показывают, что при проведении наблюдений с максимально допустимым полем зрения в фокальной плоскости телескопа необходимо устанавливать диафрагму, препятствующую переналожению периферийных частей изображений соседних каналов, а для спектрополяриметрических наблюдений протяженных объектов – следует использовать узкую щель.

Основные параметры прибора представлены в таблице.

Выводы

1. Приведен обзор существующих схемных реализаций стокс-поляриметров и предложена концепция панорамного изображающего стокс-поляриметра, который может быть использован для поляриметрических наблюдений астрономических объектов с быстропротекающими процессами.

2. Коллиматор образует систему параллельных лучей, в которых могут быть установлены элементы, работающие только в слабосходящихся пучках (узкополосные интерференционные фильтры, дифракционные решетки и т.п.). В секторы разделенного зрачка может быть вставлена любая комбинация фильтров, фазовых пластин и дифракционных решеток. Например, описываемый панорамный поляриметр может быть оперативно (поворотом колеса со сменными элементами) преобразован в спектрополяриметр низкого разрешения.

3. Расчеты показывают, что при значительных полях зрения и широком спектральном

Таблица. Основные параметры стокс-поляриметра

Телескоп ¹	Celestron 91037-XLT ($D = 360$ мм, $f = 4000$ мм)
Поле зрения угловое / линейное на матрице	$0,25^\circ \times 0,25^\circ / 17 \times 21$ мм, (1,6"/пиксел)
Эффективное фокусное расстояние системы	1200 мм
Относительное отверстие	9,5 в каждом канале
Диаметр выходного зрачка телескопа	24 мм
ПЗС-приемник	SBIG STL 1301E
Размер пиксела матрицы	16×16 мкм
Размер матрицы	$16,5 \times 20,4$ мм
Спектральный диапазон	420–850 нм
Фильтры	4 сменных фильтра
Дифракционная решетка	Прозрачная, до 100 штрих/мм
Длина прибора	760 мм

¹ Возможно использование телескопов с диаметром главного зеркала до 1 м, относительным отверстием $D/f = 1/12 - 1/10$.

диапазоне призмы Волластона не могут быть использованы как анализаторы без дополнительных коррекционных элементов. Таким условиям наиболее соответствуют поляризационные пленки.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Tinbergen J. Astronomical polarimetry. New York: N.Y Cambridge University Press, 1996. 158 p.
2. Hough J.H. New opportunities for astronomical polarimetry // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2007. V. 106. № 1–3. P. 122–132.
3. Stokes G.G. On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources // Trans. Cambridge Philos. Soc. 1852. V. 9. P 399–416.
4. Иванов Ю.С., Синяевский И.И., Сосонкин М.Г. Астроспектрополяриметры для слабых объектов // Оптический журнал. 2006. Т.73. №12. С. 63–67.
5. Видмаченко А.П., Иванов Ю.С., Мороженко А.В., Неводовский Е.П., Синяевский И.И., Сосонкин М.Г. Спектрополяриметр наземного сопровождения космического эксперимента “Планетный мониторинг” // Космічна наука і технологія. 2007. Т.13. №1. С.63–70.
6. Ramaprakash A.N., Gupta R., Sen A.K., Tandon S.N. An imaging polarimeter (IMPOL) for multi-wavelength observations // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 1998. V. 128. №3. P. 369-375.
7. Rautela B. S., Joshi G. C., Pandey J. C. ARIES imaging polarimeter // Bull. Astr. Soc. India. 2004. V. 32. № 3. P. 159-167.

8. *Gandorfer A.M., Steiner P., Povel H.P., Aebersold F., Egger U., Feller A., Gisler D., Hagenbuch S., Stenflo J.O.* Solar polarimetry in the near UV with the Zurich Imaging Polarimeter ZIMPOL II // *Astronomy and Astrophysics*. 2004. V. 422. №2. P. 703–708.
9. *Бугаенко О.И., Гуральчук А.Л.* Астрономический спектрополяриметр. I. Основные принципы работы // *Фотометрические и поляризационные исследования небесных тел*. Киев: Наук.думка, 1985. С.160–164.
10. *Кучеров В.А., Самойлов В.С., Чернавин В.А.* Суперахроматическая фазовая пластинка // *Оптико-механическая промышленность*. 1987. Т.54. №9. С. 57–58.
11. *Кучеров В.А.* Ахроматический фазосдвигатель для вакуумного ультрафиолета // *Кинематика и физика небесных тел*. 1996. Т. 12. №1. С. 52–58.
12. *Shearer A., Stappers B., O'Connor P., Golden A., Strom R., Redfern M. and Ryan O.* Enhanced optical emission during Crab giant radio pulses // *Science*. 2003. V. 301. №5632. P. 493–495.
13. *McLaughlin M.A., Lyne A.G., Lorimer D.R., Kramer M., Faulkner A.J., Manchester R.N., Cordes J.M., Camilo F., Possenti A., Stairs I.H., Hobbs G., D'Amico N., Burgay M., and O'Brien J.T.* Transient radio bursts from rotating neutron stars // *Nature*. 2006. V. 439. №7078. P. 817–820.
14. *Azzam R.M.A.* Division-of-amplitude photopolarimeter (DOAP) for the simultaneous measurement of all four stokes parameters of light // *Optica Acta*. 1982. V. 29. P. 685–689.
15. *Mudge J., Virgen M., Dean P.* Near-infrared simultaneous Stokes imaging polarimeter // *Proc. SPIE*. 2009. V. 7461. P. 74610L-1–74610L-6.
16. *Pezzaniti J.L., Chenault D., Roche M., Reinhardt J., Pezzaniti J.P., Schultz H.* Four camera complete Stokes imaging polarimeter // *Proc. SPIE*. 2008. V. 6972. P. 69720J-1–69720J-12.
17. *Collins P., Redfern R.M., Sheeha B.* Design, Construction and Calibration of The Galway Astronomical Stokes Polarimeter (GASP) // *AIP Conference Proceedings*. 2008. V. 984. P. 241–246.
18. *Tyo J. S., Goldstein D. L., Chenault D.B., Shaw J.A.* Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications // *Applied Optics*. 2006 V. 45. №22. P. 5453–5469.
19. *Meriaudeau F., Ferraton M., Stolz C., Morel O., Bigue L.* Polarization imaging for industrial inspection // *Proc. SPIE*. 2008. V. 6813. P. 681308-1–681308-10.
20. *Wolfe W.L.* Properties of optical materials // *Handbook of optics/ De. By W.G. Driscoll*. New York: McGraw-Hill book company, 1978. Pt. 1. P. 1–157.
21. *Oliva E.* Wedged double Wollaston, a device for single shot polarimetric measurements // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1997. V. 123. №3. P. 589–592.