
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 520.85:535.4
DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-8-717-728

ИССЛЕДОВАНИЕ ОШИБОК ФАЗОВЫХ ПЛАСТИН СТОКС-ПОЛЯРИМЕТРА

Д. Е. КУКУШКИН¹, А. В. БАХОЛДИН¹, В. Д. БЫЧКОВ², Г. Г. ВАЛЯВИН^{2,3}

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: dekukushkin@corp.ifmo.ru

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, 369167, Нижний Архыз, Россия

³Крымская астрофизическая обсерватория РАН,
369167, Республика Крым, Бахчисарайский р-н, Научный, Россия

Представлена оптическая схема стокс-поляриметра для спектрографа высокого спектрального разрешения Большого Телескопа Азимутального. Приведены паспортные ошибки использующихся в составе поляриметра фазовых пластин. Приведена математическая модель работы фазовых пластин на основе матриц Мюллера. Выполнено сравнение результатов работы модели с результатами измерений изготовленных фазовых пластин. Произведена оценка инструментальной поляризации фазовых пластин. В результате численного моделирования получены значения ошибок измерения параметров Стокса.

Ключевые слова: *стокс-поляриметр, инструментальная поляризация, фазовые пластины, поляризационная оптика*

Введение. В настоящее время астрономические исследования спектров поляризации космических объектов приобрели ощутимую значимость. С помощью такого типа исследований [1] изучаются магнитные поля звезд, определяется ориентация орбит экзопланет, исследуются эффекты отражения в атмосферах звезд, в аккреционных дисках и многое другое. Поэтому практически все спектрометры оснащаются поляризационными модулями, позволяющими производить измерения всех четырех параметров Стокса.

Стокс-поляриметры состоят из различных оптических компонентов, которые изменяют состояние поляризации входящего излучения определенным (контролируемым) способом [2]. К числу этих компонентов относятся фазосдвигающие устройства и поляризаторы. Так как прозрачность атмосферы для оптического излучения является главным ограничивающим фактором, оптимальными для астрономических исследований были признаны стокс-поляриметры, построенные по двулучевой схеме или схеме быстрой модуляции сигнала [3]. Такие схемы минимизируют влияние атмосферы на результаты измерения. Оптическую схему поляриметра необходимо согласовывать с телескопом, что накладывает дополнительные ограничения.

Разработанный стокс-поляриметр предназначен для размещения в первичном фокусе главного зеркала БТА в составе эшелле-спектрографа высокого спектрального разрешения [1], такой подход позволяет выполнять спектро-поляриметрические исследования. В работе [4] приведены оптическая схема с конструктивными параметрами компонентов, принципиальная схема с поляризатором — призмой Волластона, оценка качества изображения, пропускания

системы и предварительной оценкой инструментальной поляризации. Принципиальная схема работы поляриметра приведена на рис. 1 (ПД — полевая диафрагма, 1 — коллимационный объектив, 2 — полуволновая и четвертьволновая фазовые пластинки, поочередно вводимые в ход лучей, 3 — призма Волластона, которая делит пучок на два ортогональных поляризованных, 4 — проекционный объектив, который строит изображение двух ортогонально поляризованных пучков света на соответствующих торцах оптоволоконных каналов, 5 — оптоволоконные каналы, переносящие излучение в спектрограф). Поляриметр располагается в навесной части спектрографа, соединяемой с самим спектрографом посредством оптоволоконного канала длиной 53 м. Поляриметр состоит из двух объективов, фазосдвигающих пластин (ФП) и призмы Волластона. В фокальной плоскости главного зеркала телескопа устанавливается полевая диафрагма, которая формирует рабочее поле поляриметра до 2", что соответствует размеру изображения телескопа диаметром 0,23 мм. Таким образом, все параметры Стокса входящего излучения определяются посредством измерения интенсивности каждого пучка при различных положениях ФП поляриметра. Кратко обсудим основные источники инструментальной поляризации. На параметры Стокса входящего излучения влияют все компоненты, расположенные до поляризационного делителя — призмы Волластона.

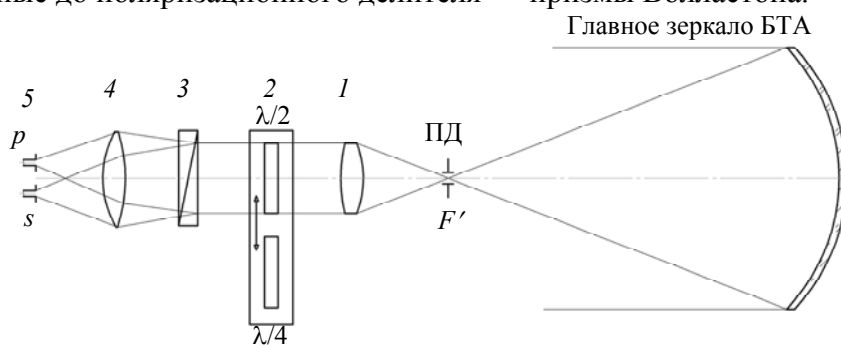


Рис. 1

Наибольшее влияние на параметры Стокса вносят атмосфера Земли и межзвездная среда: для объектов со степенью поляризации не более 5 % параметры Стокса могут быть измерены с погрешностью 0,025 % ($\delta=10^{-4}$) [5]; для объектов с большей степенью поляризации (до 10 %) ошибка может достигать 0,2 % ($\delta=10^{-3}$) [6].

Следующим компонентом, влияющим на параметры Стокса падающего излучения, является главное зеркало телескопа. Согласно формулам Френеля, металлическое покрытие может привести к сдвигу фаз между поляризационными компонентами p и s в отраженном свете, наибольшее изменение поляризации испытывают наклонные пучки света, падающие на зеркало под углом, отличным от нормали. При отсутствии дефектов в покрытии (местные ошибки) зеркала вносимая им инструментальная поляризация компенсируется за счет симметричности относительно оси зеркала. Поляризация, вносимая главным зеркалом телескопа, обычно не исследуется отдельно [7], так как она существенно меньше поляризации вспомогательных наклонных зеркал и атмосферы. Наклонные зеркала служат для организации оптического канала платформы Несмита, в котором располагаются основные инструменты телескопа. Размещение поляриметра в первичном фокусе главного зеркала позволяет повысить точность измерения. На основе методов оценки [8, 9] с учетом местных ошибок главного зеркала [10] оценена [11] степень деполяризации, вносимая главным зеркалом БТА — $\delta=10^{-4}$.

Линзовый коллиматор (рис. 1), необходимый для организации светового пучка необходимого диаметра, также влияет на состояние поляризации падающего излучения. На параметры Стокса в линзах влияют: остаточное двулучепреломление в местах крепления линз в оправе и эффекты преломления света на границе раздела двух сред. При этом ошибки, вносимые отдельными линзами, зависят от угла падения луча на поверхность линзы. Согласно

работе [12] инструментальная поляризация линзового дублета $\delta=10^{-3}—10^{-4}$, согласно паспортным данным призма Волластона должна обеспечить погрешность не выше 10^{-5} (паспортные данные используемых фазосдвигающих пластин приводятся в табл. 1). Вследствие этого возникла необходимость учета неидеальности используемых элементов для поляриметрического модуля.

Таблица 1
Характеристики полуволновой и четвертьволновой фазовых пластинок

Длина волны, нм	Сдвиг фазы, град	
	$\lambda/2$	$\lambda/4$
400	178,5	88,9
450	180,5	90,6
500	179,7	90,3
550	179	90,3
600	179,3	90,6
650	180,6	90,6
700	181,1	89,8
750	180,7	88,4
800	179,3	86,7
850	176,4	

Целью настоящей работы является исследование инструментальной поляризации, вносимой фазосдвигающими пластинами, и определение ее влияния на точность измерения параметров Стокса. Измеренные значения сравниваются с аналитической моделью.

Современный уровень астрономических исследований установил планку точности измерения параметров Стокса $[\Delta Q, \Delta U, \Delta V] \delta=10^{-6}$ [13], что подтверждает актуальность данной работы. Такая высокая точность необходима для исследования экзопланет и других удаленных объектов. Однако для исследования самых близких звезд с экзопланетами достаточно точности измерения параметров Стокса $\delta=10^{-3}$ [14, 15].

Применение формализма матриц Мюллера для описания поляриметрического модуля. Для описания состояния поляризации входящего излучения используется вектор Стокса [16]. Вектор Стокса входящего $S = [I, Q, U, V]$ и выходящего излучения $S' = [I', Q', U', V']$ полностью описывает состояние поляризации света и позволяет получить все параметры поляризации света, такие как ее полная интенсивность I , азимутальный угол φ , эллиптичность ϵ и степень поляризации P . Для нахождения вектора Стокса выходящего излучения применяется метод матриц Мюллера. Тогда вектор Стокса для выходящего излучения:

$$S' = M \times S, \quad (1)$$

где M — (4×4) -матрица Мюллера, каждый элемент которой несет информацию об описываемой оптической системе. Матрица Мюллера позволяет определить интенсивность прошедшего через систему света. Если световая волна последовательно проходит через группу оптических элементов, то результирующее воздействие такого ряда устройств

$$M_{\text{комб}} = M_N M_{N-1} \dots M_{II} M_I, \quad (2)$$

где M_N — матрица Мюллера для N -го оптического элемента, воздействующего на волну; индексы I, II, \dots, N указывают порядок, в котором расположены оптические элементы на пути волны [17]. Основным достоинством этого метода является то, что он позволяет работать с частично поляризованным и немонохроматическим излучением.

Для теоретической оценки инструментальной поляризации, вносимой фазовыми пластинками, обратимся к формализму матриц Мюллера. Зная матрицу Мюллера каждого компонента системы и вектор Стокса входящего излучения, можно найти вектор Стокса выходящего излучения согласно формуле (1).

Измерения проводятся по стандартному двулучевому методу модуляции сигнала, вращая фазосдвигающие пластинки на определенные углы при неизменном положении поляризатора. Для оценки инструментальной поляризации, вносимой фазосдвигающими пластинками, необходимо смоделировать изменение состояния поляризации проходящего через поляриметр света, при помощи описанного выше метода.

Матрица Мюллера идеального линейного поляризатора, ориентированного под углом θ :

$$M_{\pm} = 0,5 \begin{bmatrix} 1 & C_2 & S_2 & 0 \\ C_2 & C_2^2 & C_2 S_2 & 0 \\ S_2 & C_2 S_2 & S_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C_2 = \cos 2\theta; S_2 = \sin 2\theta,$$

$$M_w(\theta = 0) = 0,5 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Так как известны характеристики фазосдвигающих пластинок, представленных в табл. 1, возможно использовать матрицу Мюллера, более точно описывающую ошибки, вносимые этими пластинками.

Матрица Мюллера фазосдвигающей пластинки в общем случае:

$$M_{\Phi\Pi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\sigma & \sin\sigma \\ 0 & 0 & -\sin\sigma & \cos\sigma \end{bmatrix},$$

σ — сдвиг фазы. Ориентацию быстрой оси пластинки, которая определяется углом φ , можно задать при помощи стандартной матрицы поворота $R(\varphi)$, быстрая ось которой ориентирована под углом φ :

$$R(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\varphi) & \sin(2\varphi) & 0 \\ 0 & -\sin(2\varphi) & \cos(2\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

тогда матрица Мюллера фазосдвигающей пластинки с произвольным смещением фазы σ и углом ориентации быстрой оси φ имеет вид:

$$M_{\Phi\Pi} = R(-\varphi) \times M \times R(\varphi). \quad (3)$$

Используя такой метод нахождения матриц Мюллера фазосдвигающих пластин, возможно учесть вносимые ими ошибки на этапе численного моделирования прохождения естественно поляризованного света через поляриметрический модуль.

При измерении приемник регистрирует интенсивность излучения каждого канала поочередно. Соответственно зная интенсивность при различных положениях фазовых пластин, возможно определить все три параметра Стокса, используя известные соотношения. Для повышения точности измерений количество измерений удваивается в сравнении с минимально необходимым.

Перед непосредственными измерениями параметров Стокса необходимо определить угловую ориентацию ФП и вносимые ими ошибки в регистрируемые значения интенсивности в

обоих каналах поляриметра. Для этого последовательно были собраны оптические схемы с целью измерения ошибок, вносимыми обеими ФП.

Измерение ошибок, вносимых полуволновой ФП. На рис. 2 приведена оптическая схема для юстировки полуволновой ФП: 1 — полупроводниковый лазер на основе GaInP ($\lambda=680$ нм), 2 — коллиматор, 3 — призма Волластона, 4 — полуволновая пластина, 5 — проекционный объектив, 6 — бленда для наблюдения одного из лучей, 7 — цифровой регистратор интенсивности излучения.

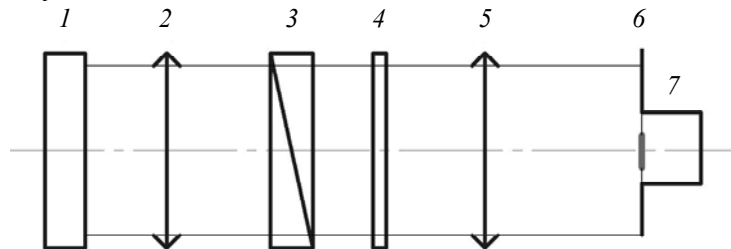


Рис. 2

Все элементы выставлены перпендикулярно оптической оси, фазосдвигающая пластина $\lambda/2$ вращается вокруг оптической оси на заданное число шагов шагового двигателя (ШД). Шаги отсчитываются от некоторого фиксированного „нулевого“ положения. При этом фиксируются показания приемника (в цифровом виде). Эта операция выполняется последовательно для обоих лучей, выходящих после призмы Волластона. Условно эти лучи обозначаем как „ближний“ и „дальний“ (обыкновенный и необыкновенный). В качестве приемника выступает кремниевый фотодиод ФД-7К с рабочим спектральным диапазоном $\Delta\lambda=0,4\text{—}1,12$ мкм, $\lambda_{\text{max}}=0,63\text{—}0,92$ мкм. Максимальная чувствительность приемника согласована с основной длиной волны излучения полупроводникового лазера на основе GaInP ($\lambda=680$ нм). Нормированные результаты для одного из пучков представлены на рис. 3 (погрешность измерения интенсивности излучения цифровым регистратором составляет $0,005\text{—}0,01$ о.е. $\pm 0,1$ мВ), где величина потока (ось Y) представлена в зависимости от угла поворота в шагах ШД (ось X). Хорошо видна модуляция регистрируемой интенсивности потока выходящего луча из призмы Волластона. По измеренным значениям определяется шаг ШД. Период функции модуляции составляет 635 шагов ШД что соответствует углу поворота ФП $\lambda/2$ на угол 90° , следовательно, 1 шаг ШД равен $0,14^\circ$.

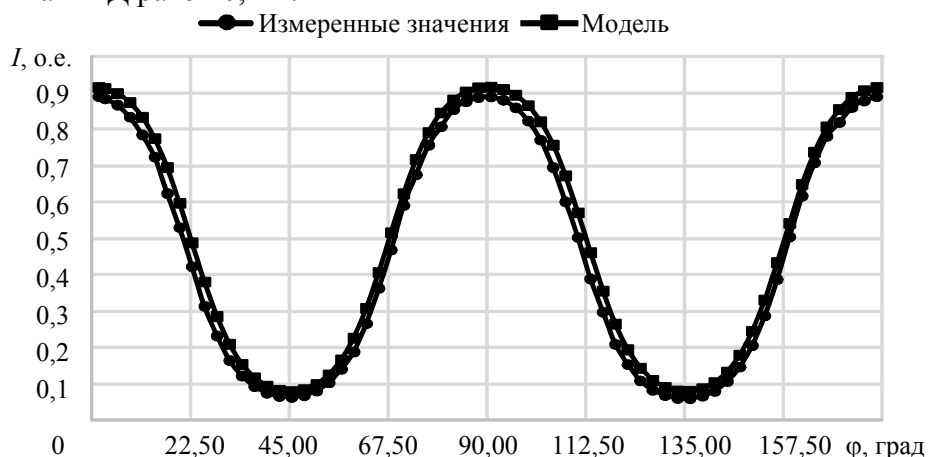


Рис. 3

Построим математическую модель лабораторной установки с полуволновой ФП, используя формализм Мюллера. Вектор Стокса выходящего излучения лабораторной установки для юстировки полуволновой пластины:

$$S' = R(-\varphi_1) \times M_{\lambda/2} \times R(\varphi_1) \times R(-\varphi_2) \times M_w \times R(\varphi_2) \times S, \quad (4)$$

где $M_{\lambda/2}$ — матрица Мюллера полуволновой пластины на длине волны 700 нм (ближайшая к 680 нм).

На вход подается естественно поляризованный свет $S=[1,0,0,0]$, что в максимальной степени соответствует излучению лазера. В модели полуволновая пластина поворачивается на $2,84^\circ$, что соответствует 20 шагам ШД. В результате получается график интенсивности для обыкновенного луча (см. рис. 3). Расчетные значения для необыкновенного и обыкновенного лучей равны по модулю. Как видно из рисунка, рассчитанные и измеренные значения совпадают по периоду и различаются по амплитуде. Отличия в амплитуде можно объяснить тем, что в модели учитываются ошибки только полуволновой ФП, а падающее излучение полностью неполяризовано.

График разности амплитуд интенсивностей измеренных и рассчитанных значений для ближнего луча в зависимости от угла поворота фазовой полуволновой пластины представлен на рис. 4.

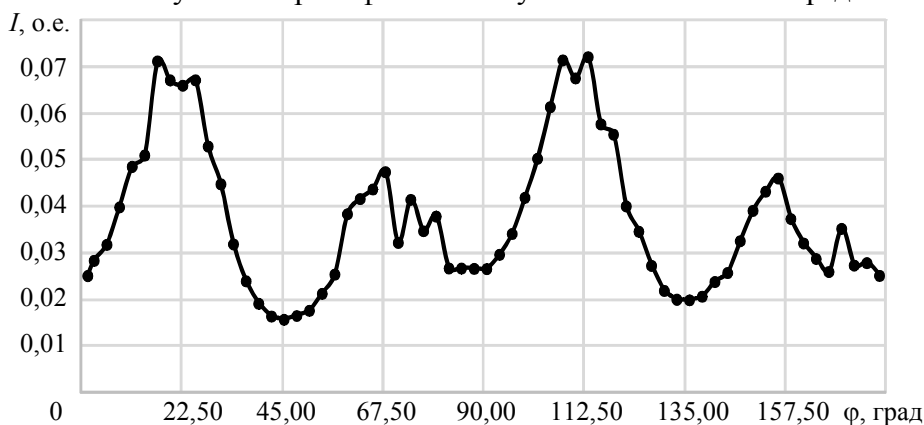


Рис. 4

Постоянная составляющая разности значений интенсивностей прошедшего света 0,01577, максимальная разность 0,07220. При этом, как видно из графика, максимальная разница наблюдается при углах ориентации быстрой оси полуволновой ФП $\varphi_1=22,5$ и $112,5^\circ$, минимальная — при $\varphi_1=45$ и 135° . Отсутствие полной амплитуды при углах пластины $\varphi_1=67,5$ и $157,5^\circ$, а также разница интенсивности между измеренными и рассчитанными значениями могут объясняться инструментальными эффектами вносимыми источником излучения, призмой Волластона, коллимирующим объективом.

По графику разности амплитуд интенсивностей измеренных и рассчитанных значений для ближнего луча была найдена аппроксимирующая функция:

$$F(\varphi) = \left(0,02815 \sin\left(\frac{\varphi-5}{7,8}\right) \right) + 0,02815,$$

для удобства постоянная составляющая была вычтена.

Принимая во внимание полученные значения можно сделать вывод, что наименьшая ошибка при измерениях на поляриметре достигается при положении быстрой оси полуволновой ФП $\varphi_1=45$ и 135° , максимальная — при $\varphi_1=22,5$ и $112,5^\circ$.

Рассмотрим случай наибольшей разницы амплитуд интенсивностей измеренных и рассчитанных значений $\lambda=700$ нм. Угол быстрой оси полуволновой пластинки $\varphi_2=22,5^\circ$, с учетом паспортных данных пластинки на этой длине волны, матрица Мюллера имеет следующий вид:

$$M_{\lambda/2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 9,214 \times 10^{-5} & 1 & 0,014 \\ 0 & 1 & 9,214 \times 10^{-5} & -0,014 \\ 0 & -0,014 & 0,014 & -1 \end{bmatrix}.$$

Вектор Стокса выходящего излучения найдем из выражения:

$$S'_{700} = R(-\varphi_1) \cdot M_{\lambda/2} \cdot R(\varphi_1) \cdot R(-\varphi_2) \cdot M_w \cdot R(\varphi_2) \cdot S, \quad (5)$$

$$S'_{700} = [0,5; -0,000046; -0,499954; 0,006787], \quad \varphi_1 = 90^\circ.$$

Зная вектор Стокса, можно найти степень линейной поляризации излучения P , азимутальный угол φ и эллиптичность ε :

$$P = \left[(Q')^2 + (U')^2 \right]^{1/2} / (I')^2 = 0,99990786, \quad (6)$$

$$\varphi = 0,5 \arctg(U' / Q') = 44,9974^\circ, \quad (7)$$

$$\varepsilon = 0,5 \arcsin \left[V' / \left[(Q')^2 + (U')^2 + (V')^2 \right]^{1/2} \right] = 0,389. \quad (8)$$

Как видно, произошла частичная деполяризация света, часть света с линейной поляризацией перешла в круговую, что ведет к потере интенсивности на приемнике. Данная модель учитывает ошибки только фазовой пластины. Как показывают измерения, реальная ошибка измерения интенсивности выходящего излучения будет больше на 1,57—7 %, в зависимости от ориентации фазовой пластины.

Измерение ошибок, вносимых четвертьволновой ФП. Оптическая схема для измерения ошибок, вносимых четвертьволновой ФП, представлена на рис. 5 (1 — светодиод, 2 — коллиматор, 3 — поляроид 1, 4 — призма Волластона, 5 — четвертьволновая пластина, 6 — проекционный объектив, 7 — поляроид 2, 8 — бленда для наблюдения одного из лучей, 9 — цифровой регистратор интенсивности излучения).

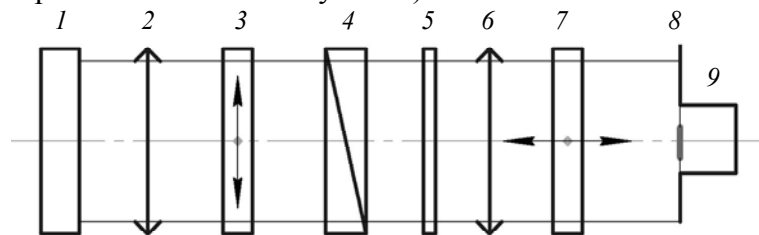


Рис. 5

В качестве источника излучения использовался светодиод, спектральная интенсивность излучения светодиода превышает 80 % в диапазоне $\lambda = 532\text{—}645$ нм, максимум излучения приходится на $\lambda = 615$ нм. Поскольку источник излучения дает не полностью линейно-поляризованный свет, была собрана следующая оптическая схема: источник излучения (светодиод) — поляроид 1 (пропускает свет с определенным направлением поляризации) — призма Волластона — бленда — цифровой регистратор интенсивности. Поворотом поляроида 1 вокруг оптической оси был достигнут максимум излучения в одном из лучей, выходящем из призмы Волластона. Далее в световой пучок был введен поляроид 2. Поворотом поляроида 2 был достигнут минимум излучения в этом же луче выходящем из призмы Волластона. Затем в ход лучей была введена четвертьволновая ФП $\lambda/4$.

Затем, вращая фазосдвигающую пластину $\lambda/4$ вокруг оптической оси на задаваемое число шагов ШД, с помощью цифрового регистратора интенсивности измеряли зависимость величины потока от поворота пластинки в шагах ШД (измеренные значения интенсивности, см. рис. 6). Определив начальное положение пластины и зная, что один шаг ШД составляет $0,14^\circ$, можно, используя формализм Мюллера, найти расчетные значения величины потока измерительной установки. Так как источник излучает в широком спектральном диапазоне, для моделирования ошибки, вносимой ФП $\lambda/4$, использовалась наибольшая ошибка из рабочего спектрального диапазона.

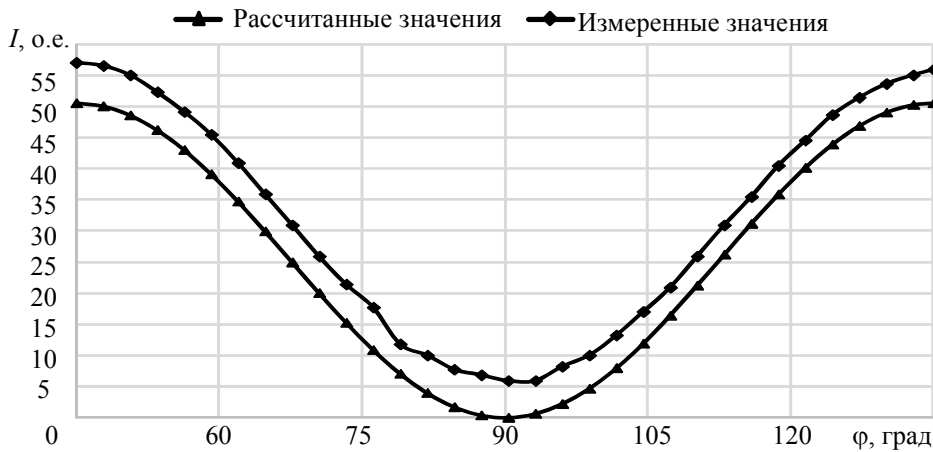


Рис. 6

Вектор Стокса выходящего излучения лабораторной установки для юстировки четвертьволновой пластины:

$$S' = R(-\varphi_1) \times M_p \times R(\varphi_1) \times R(-\varphi_2) \times M_{\lambda/4} \times R(\varphi_2) \times R(-\varphi_3) \times M_w \times R(\varphi_3) \times S, \quad (9)$$

где M_p — матрица Мюллера линейного поляризатора, $M_{\lambda/4}$ — матрица Мюллера четвертьволновой пластины на длине волны 600 нм, $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ — углы ориентации компонентов. Оси линейного поляризатора и призмы Волластона взаимно перпендикулярны. На вход подадим линейно-поляризованный свет $S=(1,1,0,0)$, который соответствует вектору Стокса излучения лазера, прошедшему через линейный поляризатор (поляроид 1). В модели полуволновую пластину поворачиваем на угол $2,84^\circ$, что соответствует 20 шагам ШД.

Как видно из рис. 6, измеренная величина потока превышает расчетную, что объясняется тем, что в модели учитывается только ошибка четвертьволновой фазовой пластины. Значение минимума интенсивности в модели составляет 0,75 %, согласно измеренным значениям минимальное значение интенсивности потока составляет 5,9 %. Данная разница значений интенсивности вызвана тем, что в модели учитывается только ошибка ФП, в экспериментальной установке дополнительные ошибки вносят: остаточная эллиптичность входного излучения, остаточные напряжения в линзах коллиматора и проекционного объектива, поляроиды, призма Волластона. В отсутствие инструментальной поляризации у оптических элементов отличие интенсивности регистрируемого сигнала от нулевого значения будет определяться только шумами приемника излучения. Разница значений потоков не обладает модуляцией, как аналогичная для измерений с полуволновой ФП.

Средняя разница значений интенсивности измеренных и рассчитанных значений составляет 5,514 %, минимальное значение 4,3 %, максимальное значение 6,82 %. Модуляция для разности интенсивности значений не происходит, ошибка равномерная во всем рабочем диапазоне углов ориентации быстрой оси ФП. Следовательно, модуляция разности интенсивности значений ФП $\lambda/2$ (рис. 3) является результатом использованной оптической схемы для измерений. Как и в случае с полуволновой ФП, дополнительная ошибка в измеренных значениях объясняется инструментальной поляризацией, вносимой остальными компонентами системы.

Найдем ошибку, вносимую четвертьволновой ФП на длине волны $\lambda=600$ нм, что соответствует максимуму излучения светодиода. Угол быстрой оси ФП $\lambda/4$ $\varphi_2=45^\circ$, учитывая паспортные данные пластинки на этой длине волны, матрица Мюллера пластинки имеет следующий вид:

$$M_{\lambda/4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,01 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -0,01 \end{bmatrix}.$$

Вектор Стокса выходящего излучения найдем из выражения (9):

$$S'_{600} = R(-90) \times M_p \times R(90) \times R(-45) \times M_{\lambda/4} \times R(45) \times R(-0) \times M_w \times R(0) \times S, \quad (10)$$

$$S'_{600} = [0, 505236; -0, 505236; 0; 0], P=1, \varphi=0, \varepsilon=0.$$

Видно, что на выходе излучение полностью линейно-поляризованное, однако интенсивность потока, прошедшего через систему из-за неидеальности ФП, несколько завышена, что является следствием инструментальной поляризации пластины. Значение нормированного на интенсивность параметра Q/I в идеальном случае должно составлять $Q/I=0,5$, рассчитанное значение превышает теоретическое $\Delta Q/I=0,05236$. Измеренные значения интенсивности сигнала при угле ориентации четвертьволновой ФП $\varphi_2=45^\circ$ (рис. 6) превышают расчетные на 6,476 %.

Оценка ошибки, вносимой ФП на измерения параметров Стокса. Принимая во внимание то, что расчетная модель для определения ошибок, вносимых ФП, подтверждается измерениями, оценим влияние этих ошибок при измерениях параметров Стокса.

Поляриметрический модуль делит пучок света на два взаимно ортогонально поляризованных пучка p и s . Приемник последовательно регистрирует интенсивность P и S пучков в зависимости от положения (угла поворота) ФП, а также от положения отсекающей диафрагмы.

Степень поляризации излучения определяется следующим выражением:

$$P_\lambda = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}). \quad (11)$$

Для измерения всех параметров Стокса необходимо снять по четыре измерения для каждого из параметров согласно [18]. Нормированный параметр Q/I может быть получен при положении полуволновой ФП под углами 0 и 45° относительно оптической оси призмы Волластона:

$$Q/I = (R-1)/(R+1), \quad R = \sqrt{(I_{0,o}/I_{0,e}) / (I_{45,o}/I_{45,e})}, \quad (12)$$

где I_o — измеренное значение интенсивности для обычного пучка лучей, I_e — измеренное значение интенсивности для необычного пучка лучей.

Нормированный параметр U/I может быть получен при положении полуволновой ФП под углами $22,5$ и $67,5^\circ$ к оптической оси призмы Волластона:

$$U/I = (R-1)/(R+1), \quad R = \sqrt{(I_{22,5,o}/I_{22,5,e}) / (I_{67,5,o}/I_{67,5,e})}. \quad (13)$$

Нормированный параметр V/I измеряется при выведенной из хода лучей полуволновой пластины и введенной четвертьволновой ФП под углами 45 и -45° относительно оптической оси призмы Волластона:

$$V/I = (R-1)/(R+1), \quad R = \sqrt{(I_{45,o}/I_{45,e}) / (I_{-45,o}/I_{-45,e})}. \quad (14)$$

Преимуществом использования данного метода является то, что различный ход обыкновенного и необыкновенного лучей после призмы Волластона не влияет на расчетные значения параметров Стокса.

Оценим ошибку, вносимую ФП при указанных ориентациях, на измерения параметров Стокса. Для этого составим аналитическую модель поляриметра с помощью матриц Мюллера и проведем последовательные измерения интенсивности выходящего излучения. На вход в модель подадим вектор Стокса, соответствующий излучению со степенью поляризации 10 %. Затем, используя соотношения, представленные выше, найдем поочередно все параметры Стокса входящего излучения. Сравнивая расчетные и исходные параметры вектора Стокса, определим ошибку. Таким образом оценим наибольшую возможную теоретическую ошибку, вносимую ФП.

Матрица Мюллера поляриметра для обыкновенного луча:

$$M_0 = R(0) \cdot M_w \cdot R(0) \cdot R(-\varphi) \cdot M_{\text{ФП}} \cdot R(\varphi), \quad (15)$$

Матрица Мюллера поляриметра для необыкновенного луча:

$$M_2 = R(-90) \cdot M_w \cdot R(90) \cdot R(-\varphi) \cdot M_{\text{ФП}} \cdot R(\varphi). \quad (16)$$

Проанализируем выходящее излучение, используя различные векторы Стокса, соответствующие входящему излучению со степенью поляризации $P=0,1$ (табл. 2). Ограничение степени поляризации входящего излучения обусловлено особенностью работы стокс-поляриметра, который в составе спектрографа работает с излучением, максимальная степень поляризации которого не превышает 10 %. Стоит отметить, что с возрастанием степени поляризации входящего излучения увеличивается ошибка измерения прибором. В расчетах использовалась максимальная ошибка фазосмещения для пластин.

Таблица 2

$P=0,1$	$P=0,1$	$P=0,1$	$P=0,10013$	$P=0,10013$	$P=0,10013$	$P=0,10046$
$S_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$S_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0,1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$S_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0,1 \end{bmatrix}$	$S_4 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,0708 \\ 0,0708 \\ 0 \end{bmatrix}$	$S_5 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0,0708 \\ 0,0708 \end{bmatrix}$	$S_6 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,0708 \\ 0 \\ 0,0708 \end{bmatrix}$	$S_7 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,058 \\ 0,058 \\ 0,058 \end{bmatrix}$

В результате численного моделирования получены следующие значения для параметра Q : наибольшая ошибка измерения $9,6 \cdot 10^{-4}$ при входящем векторе Стокса S_3 , наименьшая $9 \cdot 10^{-6}$ при S_1 .

Получены следующие ошибки параметра U : наибольшая $9,6 \cdot 10^{-6}$ при входящем векторе Стокса S_2 , минимальная $2 \cdot 10^{-7}$ при S_6 .

Для параметра V : наибольшая ошибка $1,8 \cdot 10^{-5}$ при входящем векторе Стокса S_3 , минимальная $1,3 \cdot 10^{-7}$ при S_1 .

Заключение. С помощью построенной с использованием формализма матриц Мюллера аналитической модели поляриметра произведена оценка инструментальной поляризации ФП. Расчетная модель и теоретические данные хорошо коррелируют с измеренными значениями. Разница между рассчитанными и измеренными значениями объясняется инструментальной поляризацией компонентов измерительной установки. Полученные значения ошибок для измеренных параметров Стокса позволяют оценить возможность использования данного поляриметрического модуля в астрономических задачах. Величина ошибок ФП при измерении параметров Стокса: Q — $\pm 9,6 \cdot 10^{-4}$; U — $\pm 9,6 \cdot 10^{-6}$; V — $\pm 1,8 \cdot 10^{-5}$. Изготовленные ФП вносят наименьшую ошибку измерения параметров U и V из всех возможных источников инструментальной поляризации. Одним из способов уменьшения влияния инструментальной поляризации на результаты измерений является компенсация фазовыми пластинами ошибок, вносимых предшествующими оптическими компонентами.

Инструментальная поляризация, вносимая атмосферой, телескопом и самим поляриметром, может быть учтена при работе поляриметра в составе спектрографа после наблюдения стандартных звезд.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований (18-29-21030 мк).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Valyavin G. G. et al. High-resolution fiber-fed echelle spectrograph for the 6-m telescope. I. Optical scheme, arrangement, and control system // *Astrophysical Bulletin*. 2014. Vol. 69, N 2. P. 224—239.

2. Kolokolova L., Hough J., Lvasseur-Regourd A.-C. Polarimetry of stars and planetary systems. Cambridge University Press, 2015. 503 p.
3. Tyo J. S. et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications // Applied Optics. 2006. Vol. 45. P. 5453—5469.
4. Кукушкин Д. Е. и др. Спектрограф высокого спектрального разрешения с оптоволоконным входом для 6-м телескопа САО РАН. Поляризационный модуль // Астрофизический бюллетень. 2016. Т. 71, № 2. С. 270—278.
5. Афанасьев В. Л., Амирханян В. Р. Методика поляриметрических наблюдений слабых объектов на 6-м телескопе БТА // Астрофизический бюллетень. 2012. Т. 67, № 4. С. 455—469.
6. Shakhovskoy N. M. in Methods of variable stars investigation / Ed. by V. A. Nikonov. Moscow: Nauka, 1971. P. 199.
7. Tinbergen J. Accurate optical polarimetry on the Nasmyth platform // Publications of the astronomical society of the pacific. 2007. Vol. 119. P. 1371—1384.
8. Socas-Navarro H. et al. Characterization of telescope polarization properties across the visible and near-infrared spectrum // Astronomy and Astrophysics. 2011. Vol. 531. P. A2.
9. Miller R. H. The effects of telescopes on astronomical polarization measurements // Applied Optics. 1963. Vol. 2. P. 61—65.
10. Отчет САО РАН 2014. [Электронный ресурс]: <<https://www.sao.ru/Doc-k8/Science/Public/Reports/Y2014/021-BTA-ktbt.pdf>>.
11. Kukushkin D. E. et al. Analysis of instrumental effects on polarization of the polarimetric unit in the high-spectral resolution spectrograph with fiber input for the 6m SAO RAS telescope // Proc. of SPIE. 2017. Vol. 10330. P. 103301D.
12. Barrick G., Benedict T. Experimental results from using two laminated film polarizers to make absolute measurements of polarization crosstalk in an optic // Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III. Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7735. P. 773548.
13. Fossati L. et al. Polarimetry as a tool to find and characterize habitable planets orbiting white dwarfs // Proc. of the Intern. Astronomical Union. 2015. Vol. 305. P. 325—332.
14. Roelfsem R. et al. The ZIMPOL high contrast imaging polarimeter for SPHERE: design, manufacturing and testing // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7735. P. 77354B-1—77354B-17.
15. Carciofi A. C., Magalhaes A. M. The Polarization Signature of Extrasolar Planet Transiting Cool Dwarfs // The Astrophysical J. 2005. Vol. 635. P. 570—577.
16. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
17. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет / Пер. с англ. под ред. чл.-корр. АН СССР А.В. Ржанова и К.К. Свиташева. М.: Мир, 1981. 583 с.
18. Tinbergen J., Rutten R. Measuring polarization with ISIS. Users Manual. 1997 [Электронный ресурс]: <html_manuals/wht_instr/isis_hyper/isis_hyper.html>.

Сведения об авторах

- Дмитрий Евгеньевич Кукушкин** — аспирант; Университет ИТМО, факультет прикладной оптики; E-mail: dekukushkin@corp.ifmo.ru
- Алексей Валентинович Бахолдин** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет прикладной оптики; декан, профессор; E-mail: bakholdin@aco.ifmo.ru
- Виктор Дмитриевич Бычков** — канд. физ.-мат. наук; Специальная астрофизическая обсерватория РАН, лаборатория физики звезд; ст. научный сотрудник; E-mail: vbych@sao.ru
- Геннадий Геннадьевич Валявин** — канд. физ.-мат. наук; Крымская астрофизическая обсерватория РАН; Специальная астрофизическая обсерватория РАН, лаборатория физики звезд; ст. научный сотрудник; E-mail: gvalyavin@sao.ru

Поступила в редакцию
10.05.19 г.

Ссылка для цитирования: Кукушкин Д. Е., Бахолдин А. В., Бычков В. Д., Валявин Г. Г. Исследование ошибок фазовых пластин стокс-поляриметра // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 8. С. 717—728.

STUDY OF PHASE PLATES ERRORS IN A STOKES POLARIMETER

D. E. Kukushkin¹, A.V. Bakholdin¹, V. D. Bychkov², G. G. Valyavin^{2,3}¹ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia² Special Astrophysical Observatory of the RAS, 369167, Nizhnii Arkhyz, Russia

E-mail: dekkukushkin@corp.ifmo.ru

³ Crimean Astrophysical Observatory of the RAS, 298409, Republic of Crimea, Nauchnyi, Russia

E-mail: dekkukushkin@corp.ifmo.ru

An optical schematic of the Stokes polarimeter developed for the high spectral resolution spectrograph of Large Telescope Azimuthal is presented. The passport errors of the phase plates used in the polarimeter are given. A model of the phase plates operation based on Muller matrices is described and discussed. A comparison of the model with the results of measurements of the fabricated phase plates is carried out. The instrument polarization of the manufactured phase plates is estimated. Произведена оценка инструментальной поляризации фазовых пластин. As a result of numerical simulation, the errors of the Stokes parameters measurements are obtained.

Keywords: Stokes polarimeter, instrumental polarization, phase plates, polarization optics

REFERENCES

1. Valyavin G.G. et al. *Astrophysical Bulletin*, 2014, no. 2(69), pp. 224–239.
2. Kolokolova L., Hough J., Levasseur-Regourd A.-C. *Polarimetry of stars and planetary systems*, Cambridge University Press, 2015, 503 p.
3. Tyo J.S. et al. *Applied Optics*, 2006, no. 45, pp. 5453–5469.
4. Kukushkin D.E. et al. *Astrophysical Bulletin*, 2016, no. 2(71), pp. 249–257. DOI: 10.1134/S1990341316020127
5. Afanasiev V.L., Amirkhanyan V.R. *Astrophysical Bulletin*, 2012, no. 4(67), pp. 438–452. DOI: 10.1134/S1990341312040074
6. Shakhovskoy N.M. in *Methods of variable stars investigation*, Nikonov V.A., ed., Nauka, Moscow, 1971, p. 199.
7. Tinbergen J. *Publications of the astronomical society of the pacific*, 2007, vol. 119, pp. 1371–1384.
8. Socas-Navarro H. et al. *Astronomy and Astrophysics*, 2011, vol. 531, pp. A2.
9. Miller R.H. *Applied Optics*, 1963, vol. 2, pp. 61–65.
10. <https://www.sao.ru/Doc-k8/Science/Public/Reports/Y2014/021-BTA-ktbt.pdf>. (in Russ.)
11. Kukushkin D.E. et al. *Proc. of SPIE*, 2017, vol. 10330, pp. 103301D.
12. Barrick G., Benedict T. *Proc. of SPIE*, 2010, vol. 7735, pp. 773548.
13. Fossati L. et al. *Proc. of the International Astronomical Union*, 2015, vol. 305, pp. 325–332.
14. Roelfsem R. et al. *Proc. of SPIE*, 2010, vol. 7735, pp. 77354B-1–77354B-17.
15. Carciofi A.C., Magalhaes A.M. *The Astrophysical Journal*, 2005, vol. 635, pp. 570–577.
16. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*, Pergamon Press, 1970.
17. Azzam R.M.A., Bashara N.M. *Ellipsometry and Polarized*, Amsterdam etc., 1977.
18. Tinbergen J., Rutten R. *Measuring polarization with ISIS. Users Manual*. 1997, html_manuals/wht_instr/isis_hyper/isis_hyper.html.

Data on authors

- Dmitry E. Kukushkin** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Applied Optics; E-mail: dekkukushkin@corp.ifmo.ru
- Aleksey V. Bakholdin** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Applied Optics; Dean of the Faculty, Professor; E-mail: bakholdin@aco.ifmo.ru
- Victor D. Bychkov** — PhD; Special Astrophysical Observatory of the RAS, Laboratory of Stellar Physics; Senior Scientist; E-mail: vbych@sao.ru
- Gennady G. Valyavin** — PhD; Crimean Astrophysical Observatory of the RAS; Special Astrophysical Observatory of the RAS, Laboratory of Stellar Physics; Senior Scientist; E-mail: gvalyavin@sao.ru

For citation: Kukushkin D. E., Bakholdin A.V., Bychkov V. D., Valyavin G. G. Study of phase plates errors in a Stokes polarimeter. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 8. P. 717–728 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-8-717-728