

Измерение неточности оптических элементов поляриметра

П. Лысенко

9 ноября 2015 г.

Аннотация

Для поляриметрической части спекл-поляриметра необходимо знать, насколько правильно работают имеющиеся у нас полуволновые пластинки, поляризатор и фильтры. Целью данной работы будет измерение неидеальности этих элементов т.е. будет произведена оценка, на сколько полуволновые пластинки действительно полуволновые; насколько хорошо линейный поляризатор выделяет одно направление колебаний электромагнитной волны; и наконец будет выяснено, обладают ли сами фильтры, имеющиеся у нас, двулучепреломлением. Это необходимо знать, ведь от неидеальности оптических элементов сильно зависит точность поляриметрических измерений. В данной работе представлены результаты лабораторных измерений с линейным поляризатором и полуволновой пластинкой.

Часть I

Оценка неидеальности линейного поляризатора

В данной части представлены результаты измерения неидеальности линейного поляризатора в зависимости от длины волны (с различными фильтрами). Поляризатор не должен значительно отличаться от идеального, т.к. будет использован для последующей проверки полуволновой пластины. Для теоретических расчетов использовался аппарат матриц Мюллера и векторов Стокса.

1 Эксперимент

В эксперименте использовалась следующая оптическая схема. Свет по оптоволокну проходит через линзу, в фокусе которой установлена круглая апертура диаметром 20 мкм. После прохождения через коллиматор свет падает на фильтр с диафрагмой диаметром 2мм. Потом проходит через линейный поляризатор, установленный во вращателе. Затем расположена призма Волластона. В результате на ПЗС-приемнике формируются два изображения, одно из которых поляризовано параллельно, а другое перпендикулярно рельсу. При вращении поляризатора меняются интенсивности обоих изображений источника. Из этой зависимости будет оценена неидеальность поляризатора.

При одном значении угла поляризатора получается 4 кадра. Использовались фильтры g , r , i , z . Во время измерений поляризатор делал больше одного полного оборота.

В дальнейшем планируется провести такие же измерения с фильтрами системы Бесселя (B, V, R, I) и тремя интерференционными фильтрами ($\lambda = 500nm, 550nm, 625nm$).

2 Теоретические расчеты

Для оценки неидеальности линейного поляризатора использовался аппарат матриц Мюллера. Ниже приведена матрица для линейного поляризатора

$$M_{pol} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} p_x^2 + p_y^2 & p_x^2 - p_y^2 & 0 & 0 \\ p_x^2 - p_y^2 & p_x^2 + p_y^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2p_x p_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2p_x p_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

где p_x — коэффициент отвечающий за ослабление интенсивности при прохождении через поляризатор, а p_y характеризует пропускание света, поляризованного перпендикулярно плоскости пропускания поляризатора.

Зная оптическую схему эксперимента можно рассчитать вектора Стокса после прохождения через нее.

$$S_{result} = M_{WL} * M_{rotation}(-\alpha) * M_{pol} * M_{rotation}(\alpha) * S_0 \quad (2)$$

$$S_0 = \frac{I}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$M_{rotation}(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ 0 & -\sin 2\alpha & \cos 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$M_{WL \text{ left}} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$M_{WL \text{ right}} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

где S_0 — вектор Стокса неполяризованного излучения источника (I - интенсивность), $M_{rotation}(\alpha)$ — матрица описывающая вращение поляризатора, а M_{WL} — матрицы Мюллера призмы Волластона, для левого и правого изображения (горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно).

ПЗС камера может измерять только первый параметр Стокса - полную интенсивность. Для левого и правого изображения получаем значение интенсивности изображения

$$F_l = k_l \frac{I}{4} ((p_x^2 + p_y^2) + (p_x^2 - p_y^2) \cos 2\alpha) \quad (7)$$

$$F_r = k_r \frac{I}{4} ((p_x^2 + p_y^2) - (p_x^2 - p_y^2) \cos 2\alpha) \quad (8)$$

где k_l и k_r — коэффициенты к потокам, введенные из-за неоднородной чувствительности матрицы.

Будем считать, что $k_l = k_r(1 + \Delta k)$, где $\Delta k \ll 1$.

Для избавления от полной интенсивности источника будем оценивать величину:

$$Q = \frac{F_l - F_r}{F_l + F_r} = \left(\frac{p_x^2 - p_y^2}{p_x^2 + p_y^2} \right) \cos 2\alpha + \frac{\Delta k}{2} \left(\frac{p_x^2 - p_y^2}{p_x^2 + p_y^2} \right)^2 \cos^2 2\alpha + \frac{\Delta k}{2} \quad (9)$$

для удобства введем обозначения $\eta = \left(\frac{p_x^2 - p_y^2}{p_x^2 + p_y^2} \right)$, $\kappa = \frac{\Delta k}{2}$. В результате получим:

$$Q = \eta \cos 2\alpha + \kappa \eta^2 \cos^2 2\alpha + \kappa \quad (10)$$

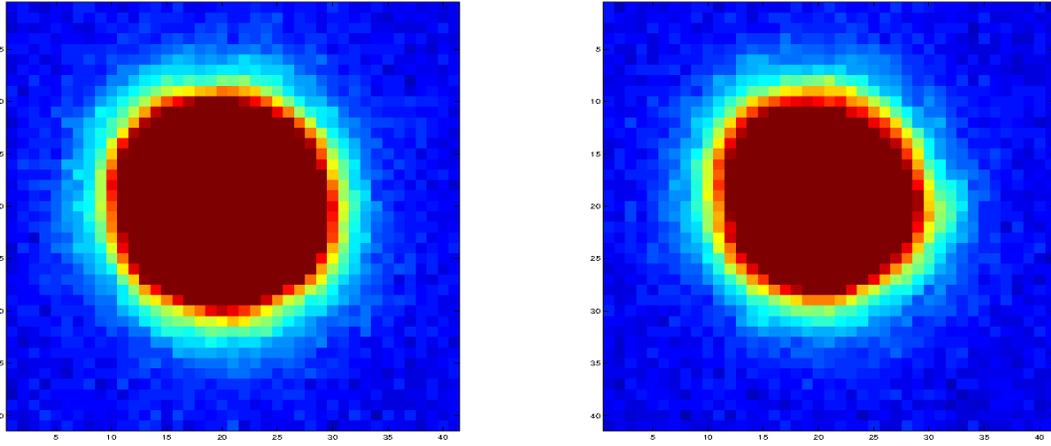


Рис. 1: Пример обрабатываемых изображений

3 Обработка и результаты

3.1 Методика обработки

Из каждого кадра вычиталось медианное значение BIAS. Перед расчетом потоков необходимо определить размеры и положения окон, в которых находятся оба изображения. Окна выбирались постоянных размеров и с постоянным взаимным положением. Пример изображений, по которым считался поток, на рис.1. Уровень фона оценивался в области кольца, шириной 20 пикселей, вокруг окна каждого изображения.

Был проведен анализ зависимости потока в окне от его размеров. Оптимальная полуширина окна — 20 пикселей (см. рис. 2). При таком размере поток от изображения уже вышел на постоянный уровень, а пикселей занятых фоном не так много.

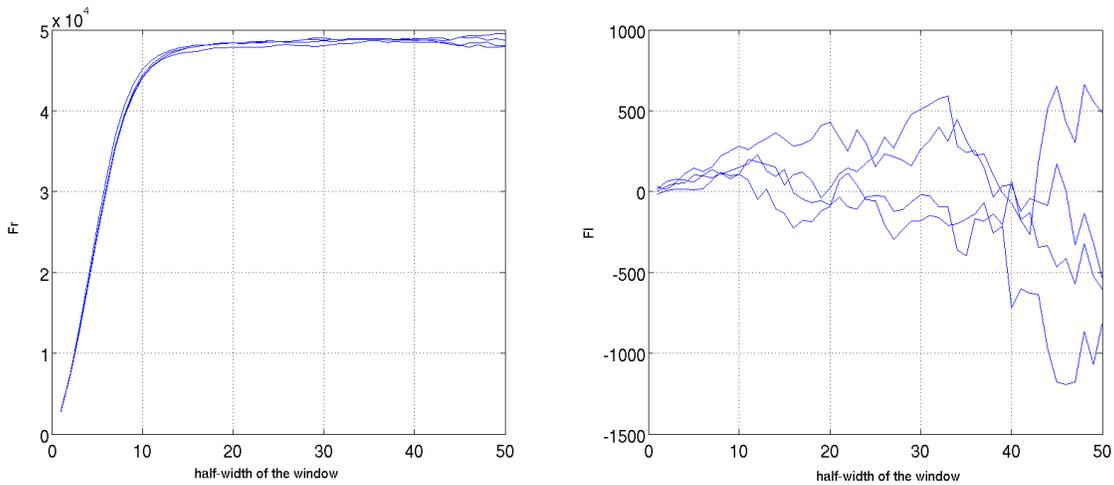


Рис. 2: К выбору размеров окна. Кривые роста для кадров с одним углом поворота поляризатора. Правое изображение имеет минимум интенсивности.

Кадры при одном положении поляризатора усреднялись, и затем считался поток для полученных изображений.

3.2 Результаты

Отношение полуразности к полусумме потоков аппроксимировались по полученной выше формуле 10. Свободными параметрами были η , κ и ϕ (рад) — добавка, показывающая отличие нуля угла поворота поляризатора α , когда правое изображение имеет минимум интенсивности. Результаты аппроксимации представлены в таблице 1. Для фильтров, с которыми не было произведено измерений, значение коэффициента η было получено интерполяцией (таблица 2). Планируется измерение этих фильтров и уточнение результатов.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что поляризатор достаточно идеален и подходит для измерений с полуволновой пластинкой. Так же видно, что ориентация быстрой оси поляризатора не зависит от длины волны. Можно сделать вывод о том, что поляризатор годится для использования при ПЭС поляриметрии, которая будет проведена в дальнейшем.

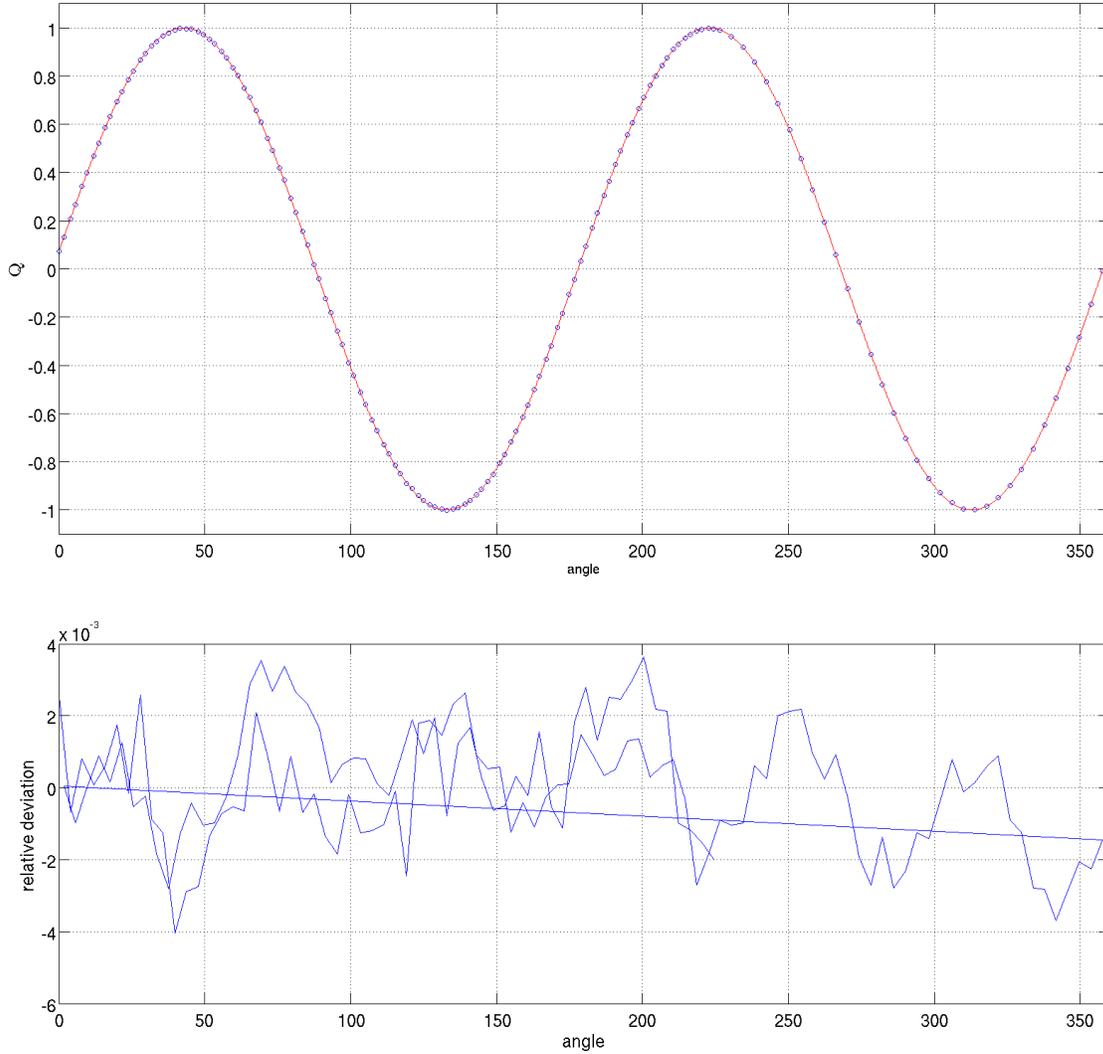


Рис. 3: Аппроксимация на примере фильтра i

	g	r	i	z
η	0.99182 ± 0.00117	0.99939 ± 0.00045	1.00010 ± 0.00037	0.99793 ± 0.00119
κ	0.00150 ± 0.00108	0.00001 ± 0.00042	0.00001 ± 0.00034	0.00029 ± 0.00109
ϕ	2.3919 ± 0.00058	2.3919 ± 0.00023	2.3919 ± 0.00019	2.3919 ± 0.00060

Таблица 1: Результат аппроксимации

	B	V	R	I
η	0.99008	0.99583	0.99964	0.99899

Таблица 2: Результат интерполяции для неизмеренных фильтров

Часть II

Оценка неидеальности полуволновых пластин

4 Эксперимент

Оптическая схема эксперимента такая же как и с линейным поляризатором, однако, теперь во вращателе установлены полуволновая пластинка, а линейный поляризатор находится перед апертурой.

Перед началом эксперимента необходимо было установить линейный поляризатор таким образом, чтобы его плоскость пропускания была параллельна рельсу. Т.е. в отсутствии полуволновой пластины, вращением поляризатора добивались минимума интенсивности изображения с поляризацией перпендикулярной рельсу. Далее все измерения проводились при данном положении линейного поляризатора.

Использовались две пластины: красная и зеленая (см. рис. 4). Для определения неидеальности в зависимости от длины волны, каждая пластинка измерялась с различными фильтрами. Для красной пластинки измерения проводились с фильтрами R, I, g, r, i, z, а для зеленой пластинки с фильтрами B, V, R, I, g, r а так же с тремя интерференционными фильтрами (500 nm, 550 nm и 625nm). Для каждой комбинации пластинки и фильтра было сделано два измерения, между которыми фильтр был повернут. Это делалось для того, чтобы исследовать, обладают ли сами фильтры двулучепреломляющими свойствами.

5 Модель полуволновой пластины

Матрица Мюллера для полуволновой пластины:

$$M_{HWP} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta + \cos \delta \sin^2 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta - \cos 2\theta \cos \delta \sin 2\theta & \sin 2\theta \sin \delta \\ 0 & \cos 2\theta \sin 2\theta - \cos 2\theta \cos \delta \sin 2\theta & \cos \delta \cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta & -\cos 2\theta \sin \delta \\ 0 & -\sin 2\theta \sin \delta & \cos 2\theta \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \quad (11)$$

где θ - угол между плоскостью поляризации падающей волны и оптической осью, а δ - параметр характеризующий неидеальность, это разность фаз между волнами с параллельной и перпендикулярной поляризацией относительно оптической оси.

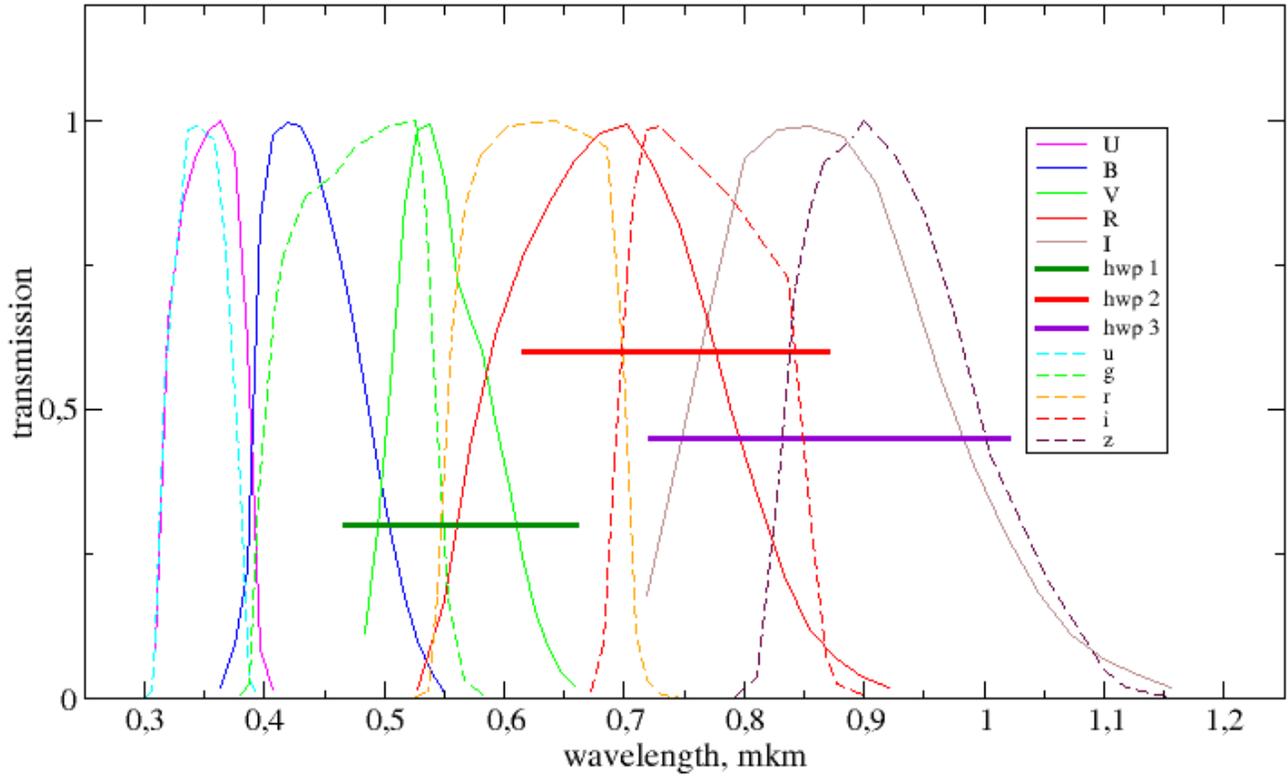


Рис. 4: Диапазоны длин волн, покрываемые пластинками, и кривые пропускания фильтров

Будем (так же как и в эксперименте с поляризатором) оценивать отношение разности потоков в левом и правом изображении к их сумме. Аналогично расчетам с линейным поляризатором получаем:

$$S_{result} = M_{WL} * M_{HWP} * M_{pol} * S_0 \quad (12)$$

Введем, как и ранее, коэффициенты к потокам из-за неоднородной чувствительности матрицы k_l и k_r . Считаем, что $k_l = k_r(1 + \Delta k)$, где $\Delta k \ll 1$. Получим:

$$F_l = k_l \frac{I}{4} (p_x^2(2 - \sin^2 2\theta(1 - \cos\delta)) + p_y^2 \sin^2 2\theta(1 - \cos\delta)) \quad (13)$$

$$F_r = k_r \frac{I}{4} (p_x^2 \sin^2 2\theta(1 - \cos\delta) + p_y^2(2 - \sin^2 2\theta(1 - \cos\delta))) \quad (14)$$

$$Q = \frac{F_l - F_r}{F_l + F_r} = 1 - \sin^2 2\theta(1 - \cos\delta)\eta - \frac{\Delta k}{2} (\sin^2 2\theta(1 - \cos\delta)\eta)^2 + \frac{2\Delta k p_x^2}{(p_x^2 + p_y^2)^2} \quad (15)$$

6 Обработка и результаты

Методика обработки такая же как и для эксперимента с линейным поляризатором. Результаты обработки представлены в таблице 3.

Таким образом, видно что зеленую пластинку можно использовать с фильтрами V,R,g,r, а красную с фильтрами I,i,z. Было получено, что ориентация быстрой оси для полуволновой пластинки сильно зависит от длины волны.

Можно видеть, что ϕ не зависит от ориентации фильтра. Это означает, что фильтры не обладают двулучепреломляющими свойствами.

	green HWP		red HWP	
	$\cos\delta$	ϕ (рад)	$\cos\delta$	ϕ (рад)
B	0.9639 ± 0.0105	0.5437 ± 0.0023		
	0.9542 ± 0.0140	0.5432 ± 0.0030		
V	0.9998 ± 0.0021	0.4867 ± 0.0004		
	1.0004 ± 0.0020	0.4867 ± 0.0004		
R	0.9910 ± 0.0016	0.5263 ± 0.0003	0.9113 ± 0.0043	0.6406 ± 0.0010
	0.9906 ± 0.0012	0.5263 ± 0.0003	0.9105 ± 0.0046	0.6409 ± 0.0010
I	0.9359 ± 0.0011	0.6050 ± 0.0002	0.9996 ± 0.0006	0.5493 ± 0.0001
	0.9361 ± 0.0013	0.6051 ± 0.0003	0.9990 ± 0.0007	0.5494 ± 0.0001
g	1.0049 ± 0.0027	0.5016 ± 0.0005		
	1.0060 ± 0.0028	0.5017 ± 0.0006		
r	0.9989 ± 0.0008	0.5111 ± 0.0002	0.8743 ± 0.0028	0.6679 ± 0.0006
	0.9984 ± 0.0009	0.5113 ± 0.0002	0.8742 ± 0.0027	0.6679 ± 0.0006
i			0.9972 ± 0.0008	0.5577 ± 0.0002
			0.9965 ± 0.0006	0.5577 ± 0.0001
z			0.9995 ± 0.0008	0.5465 ± 0.0002
			1.0000 ± 0.0007	0.5466 ± 0.0002

Таблица 3: Результаты для полуволновых пластинок. Вторая строчка для каждого фильтра соответствует второму измерению, в котором фильтр был повернут.

7 Заключение

Проведенные измерения дали множество интересных результатов. Можно видеть, что линейный поляризатор достаточно идеален и годится для использования при ПЗС поляриметрии, которая будет проведена в дальнейшем. Поляризатор гарантированно работает до длин волн 2-3 мкм, что особенно важно для применения на роботах-телескопах МАСТЕР. Результаты измерений для полуволновых пластинок следующие: зеленую пластинку можно использовать с фильтрами g,r, а красную с фильтрами i,z. Так же получено, что ориентация быстрой оси для полуволновой пластинки сильно зависит от длины волны, а для линейного поляризатора - практически нет. Исследование самих фильтров показало, что они не обладают двулучепреломляющими свойствами.