

Спекл-поляриметр 2.5 м телескопа: конструкция и юстировка

Б.С. Сафонов, П.А. Лысенко, Н.И. Шатский, М.Н. Турченко, И.В. Рыбаковский

22 февраля 2016 г.

1 Введение

Спекл-поляриметр — штатный прибор 2.5-м телескопа КГО ГАИШ МГУ, который будет реализовывать следующие наблюдательные методы астрономии: 1) поляриметрия 2) спекл-интерферометрия 3) спекл-поляриметрия 4) быстрая фотометрия.

Детальное проектирование прибора пришлось на март-май 2015 года. Сборка, отладка и юстировка прибора в лаборатории была выполнена в июле-сентябре 2015 года в КГО. Этим действиям предшествовала длительная подготовка, благодаря которой удалось выполнить их в сравнительно сжатый срок. Так, в 2010-2013 мы численно моделировали методы высокого разрешения: адаптивная оптика [1, 2], селекция изображений [3], спекл-интерферометрия [4], спекл-поляриметрия [5]. Затем (2013 год) перешли к имитации спекл-интерферометрических наблюдений в лаборатории [6, 7]. В 2014 году спекл-интерферометрия, поляриметрия и спекл-поляриметрия были реализованы на 70-см телескопе АЗТ-2 в Москве с макетом спекл-поляриметра [8, 9, 10].

К началу 2015 года окончательно сформировалась концепция прибора: инструмент для исследования структуры полного и поляризованного потока одиночных объектов размерами менее $3''$ с дифракционным разрешением. Мы остановились на пассивных методах т.к. в этом направлении возможно более быстрое и дешевое продвижение до астрофизических результатов. Селекция изображений была заброшена как низко-перспективный метод. Реализация поляриметрии и быстрой фотометрии не являлась самостоятельной целью, но эти методы относительно легко сделать на базе спекл-поляриметра.

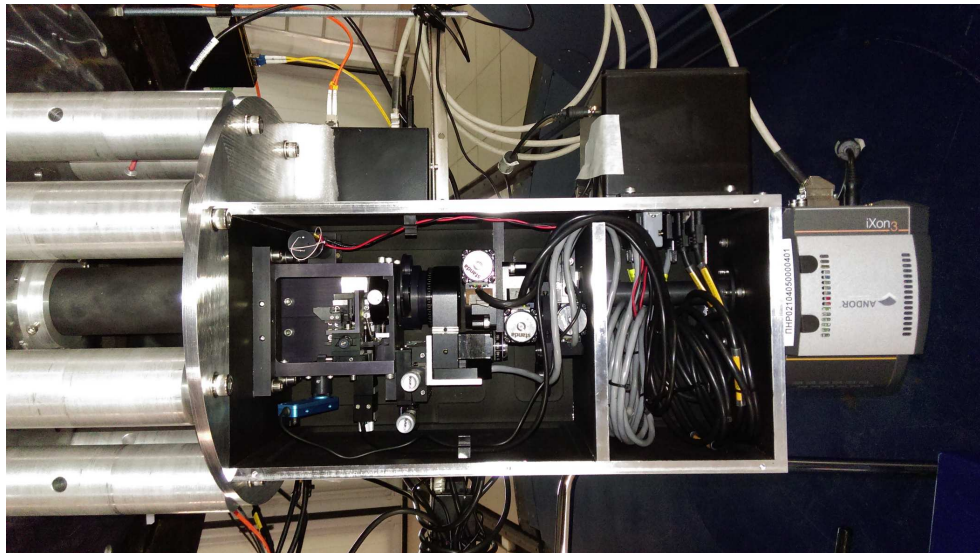


Рис. 1: Спекл-поляриметр, смонтированный в фокусе Кассегрена 2.5 м телескопа. Телескоп слева, пол справа.

Долго ли, коротко ли, 30 сентября 2015 года прибор был приведен в состояние готовности к первым тестовым наблюдениям. Эти наблюдения, называемые условно сессия 5В, были выполнены в период с 15 по 30 октября 2015 года в фокусе Кассегрена 2.5 м телескопа. Фото прибора, смонтированного в фокусе Кассегрена, приведено на рис. 1. Следующая наблюдательная сессия — сессия 5С — началась 7 января 2016 года с монтажа в фокусе Нэсмита Н2 и продолжается до настоящего момента, т.е. 22 февраля 2016 года.

В разделе 2 мы описываем состояние конструкции прибора на конец января 2016 года. В разделе 3 описана последовательность юстировки прибора. Основные обнаруженные проблемы и планы по их решению приведены в разделе 4. Документ предполагается обновлять по мере изменения конструкции прибора. Методика получения данных и их обработки, калибровочные измерения, используемые при этом, будут описаны в отдельном документе.

2 Устройство

2.1 Требования

Конструктивные решения, примененные в спекл-поляриметре, логически следуют из требований, предъявляемых к прибору, на котором предполагается реализовывать упомянутые ранее методы. Сформулируем их исходя из опыта использования макета спекл-поляриметра и теоретических соображений:

1. Прибор должен представлять собой спекл-интерферометр. Другими словами, должна обеспечиваться возможность корректной оценки пространственного спектра изображения вплоть до частоты среза оптической системы. Для этого в свою очередь требуется чтобы выполнялось следующее:
 - (a) Частота дискретизации минимум вдвое больше, чем частота среза оптической системы.
 - (b) Рабочая экспозиция не более чем в несколько раз больше чем атмосферное время когерентности. В противном случае спекл-картина замывается и соотношение сигнал-шум в спектре падает.
 - (c) Относительная ширина спектральной полосы не более чем в несколько раз больше чем r_0/D , где D — диаметр апертуры, r_0 — радиус Фрида. Несоблюдение этого требования также ведет к падению контраста спекл-картины.
 - (d) Атмосферная дисперсия должна устраняться специальным компенсатором, также для сохранения контраста спекл-картины, особенно на больших зенитных расстояниях.
2. Прибор должен представлять собой двухлучевой поляриметр с вращающейся полуволновой пластинкой. Данное решение является стандартным и наиболее часто встречающимся для прецезионных поляриметров, например, AIMPOL [11], PlanetPol [12].
 - (a) На детекторе должны регистрироваться одновременно изображения, относящиеся к горизонтальной и вертикальной поляризации, что необходимо для устранения влияния атмосферной турбулентности и флуктуаций прозрачности на измерения.
 - (b) Оптическая схема должна содержать полуволновую пластинку (HWP), позиционным углом которой можно управлять произвольно. HWP должна быть установлена как можно раньше в пучке, т.к. она играет роль модулятора. Использование одного позволяет устранить все инструментальные эффекты, возникающие после него, например, флуктуации плоского поля. Также HWP позволяет измерять оба безразмерных параметра Стокса, характеризующих линейную поляризацию.
3. Поле зрения прибора довольно мало — $5 \times 10''$ (см. раздел 2.2), а практическая точность наведения 2.5-м телескопа около $4 - 6''$ (среднеквадратическое отклонение), следовательно, нужна вспомогательная камера для уточнения наведения.
4. Для отладки и юстировки чрезвычайно полезно иметь в приборе источник света, имитирующий звезду.

Следующий раздел посвящен описанию устройства спекл-поляриметра в целом и тому, как оно удовлетворяет перечисленным требованиям.

2.2 Компоновка

Трехмерная модель прибора представлена на рис. 2, оптическая схема — на рис. 3. Базовый оптический дизайн стандартный — коллиматор формирует параллельный пучок, который затем фокусируется объективом на детекторе, отражения отсутствуют. В параллельном пучке установлены: полуволновая пластинка, призмы компенсатора атмосферной дисперсии, фильтры, призма Волластона. В первичной фокальной плоскости установлена диафрагма поля, а до нее — предфокальный блок, который включает камеру подзора и источник света.

Несущая конструкция спекл-поляриметра представляет собой коробку без одной стенки (а.к.а. крыто) размерами $200 \times 200 \times 400$ мм из плит толщиной 10 мм (обнижение до 5 мм), материал алюминий АМГ6, соединение на болтах М5. Передний и задний фланцы не имеют обнижения. Передний фланец с телескопной стороны имитирует фланец Цейсс-600 (принято как стандарт). Коробка закрывается крышкой из алюминия АМГ6 толщиной 3 мм. Непосредственно на коробке закреплен снаружи детектор на заднем фланце, внутри компенсатор дисперсии. Коробка снабжена переборкой, которая добавляет ей жесткости и разделяет ее на два отсека — первый содержит оптомеханику, а второй — в основном провода, ведущие от двигателей моторизации к их контроллерам. На переборке также закреплены: объектив, призма Волластона и колесо фильтров.

Остальные оптикомеханические элементы прибора (предфокальный блок, диафрагма поля, коллиматор и узел вращения/переключения полуволновых пластинок) закреплены на внутренней ферме, которая в свою очередь смонтирована на переднем фланце. Внутренняя ферма призвана обеспечивать стабильность взаимного положения коллиматора и полуволновой пластинки, подробнее об этом см. подраздел 2.8. Впрочем как показали эксперименты, на данный момент она не вполне справляется с этой задачей, см. раздел 4.

Предфокальный блок содержит вспомогательную камеру, источник света, линейный поляризатор, а также подвижное зеркало. Последнее приводится в движение актюатором Standa 6CMA08-15/25 и имеет три положения. Первое положение — выведено, в нем свет проходит в диафрагму поля и дальше в основную часть прибора. Второе — линейный поляризатор введен. В этом случае свет идет через линейный поляризатор. Третье — подзор введен, свет от телескопа перенаправляется на вспомогательную камеру. В то же время другое зеркало направляет свет от источника в основную часть прибора через линейный поляризатор.

Моторизация выполнена на компонентах Standa, полное число приводов 6 шт., также реализовано управление источником света. Контроллеры приводов моторизации размещены в блоке электроники, который закреплен снаружи на корпусе. Контроллеры соединены с компьютером по USB через USB-концентратор, также расположенный в блоке электроники.

2.3 Оптическая схема

Оптическая схема основной части приведена на рис. 3 (модель Zemax). В качестве коллиматора и объектива применяются двухлинзовые ахроматы производства Edmund Optics (далее EO) арт. 49-953-INK ($D=15$ мм, $F=20$ мм) и арт. 67-334-INK ($D=25$ мм, $F=160$ мм), соответственно. Расчетное увеличение 8 раз¹, эффективное фокусное расстояние схемы телескоп+прибор 160 м, эффективное относительное отверстие $F/64$. Учитывая, что размер пикселя детектора 16 мкм, удвоенная частота среза сравнивается с частотой дискретизации при $\lambda = 470$ нм. Таким образом, для более длинноволнового излучения удовлетворяется условие теоремы Котельникова и, следовательно, возможна корректная оценка пространственного спектра объекта (требование 1а).

Ширина параллельного пучка и размер выходного зрачка составляют 2.5 мм, т.е. увеличение коллиматора 1000 раз. Расстояние от задней вершины коллиматора до выходного зрачка 15.5 мм, до передней

¹Заметим, что реальное увеличение может незначительно отличаться от расчетного, оно измеряется в ходе специальной калибровочной процедуры, описанной отдельно.

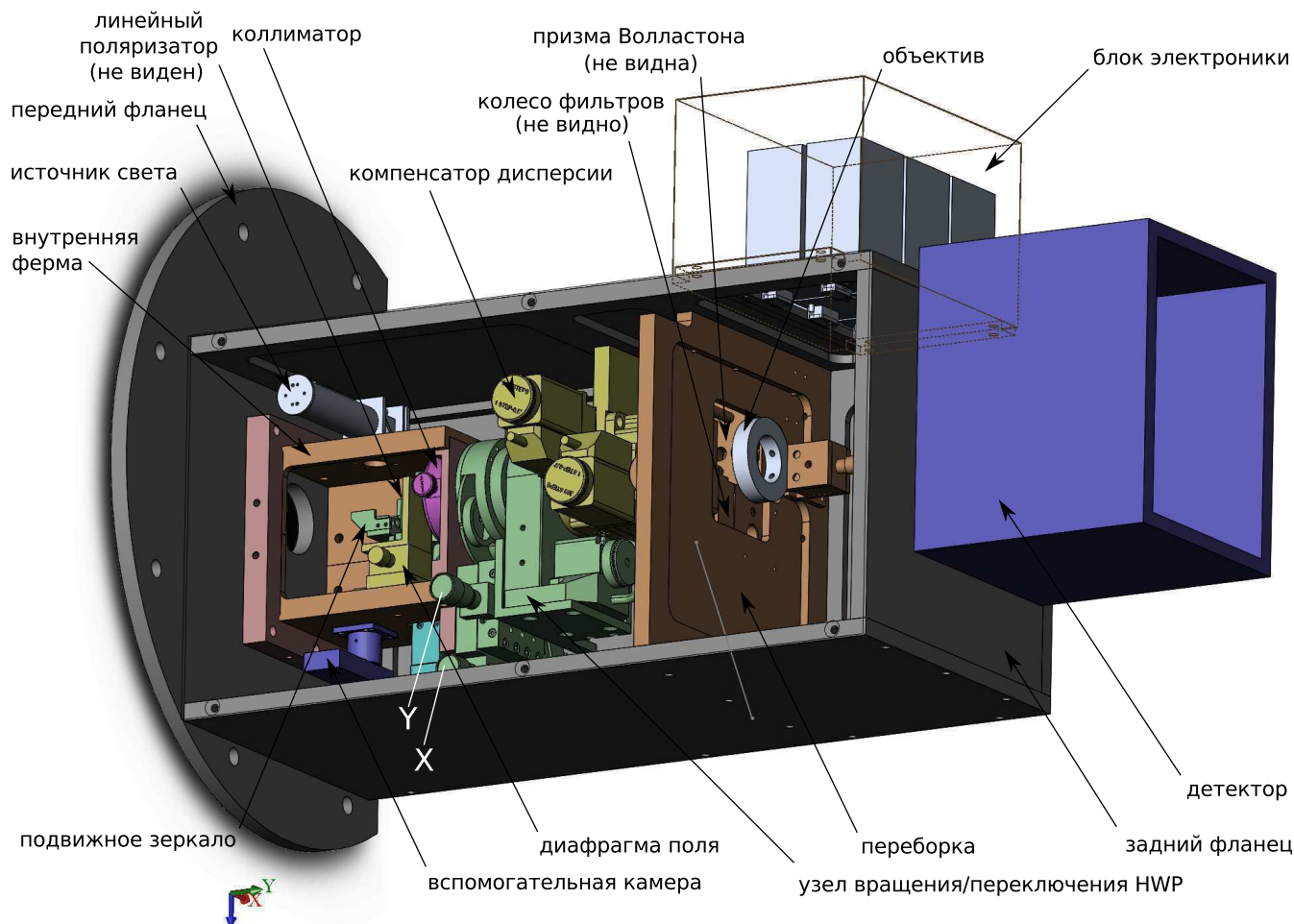


Рис. 2: Трехмерная модель спекл-поляриметра, вид с направления OX (соглашения по координатам см. далее).

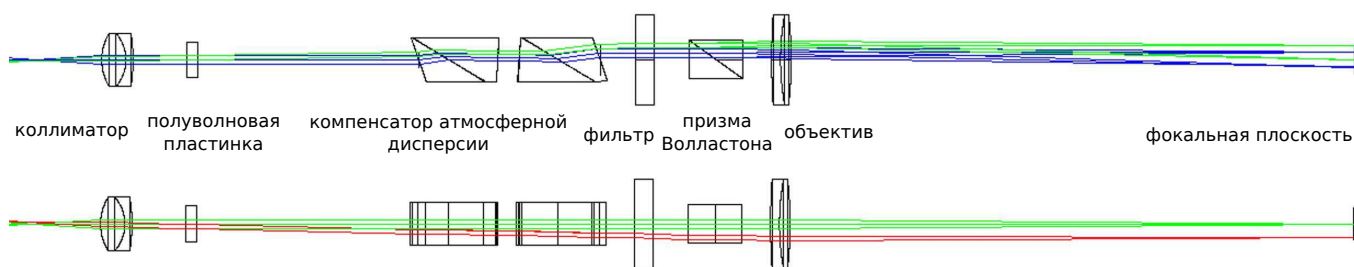


Рис. 3: Оптическая схема основной части спекл-поляриметра (так свет идет в рабочем режиме). Вверху — вид на прибор в направления OY , внизу — с направления OX (соглашения по координатам см. далее). Синий пучок — осевой, зеленый соответствует смещению в $2.5''$ — это край поля зрения по его короткой стороне, красный — смещению в $5''$ в перпендикулярном направлении — край поля зрения по длинной стороне. После призмы Волластона пучки раздваиваются. На схеме не представлен предфокальный блок — вспомогательная веб-камера и источник света.

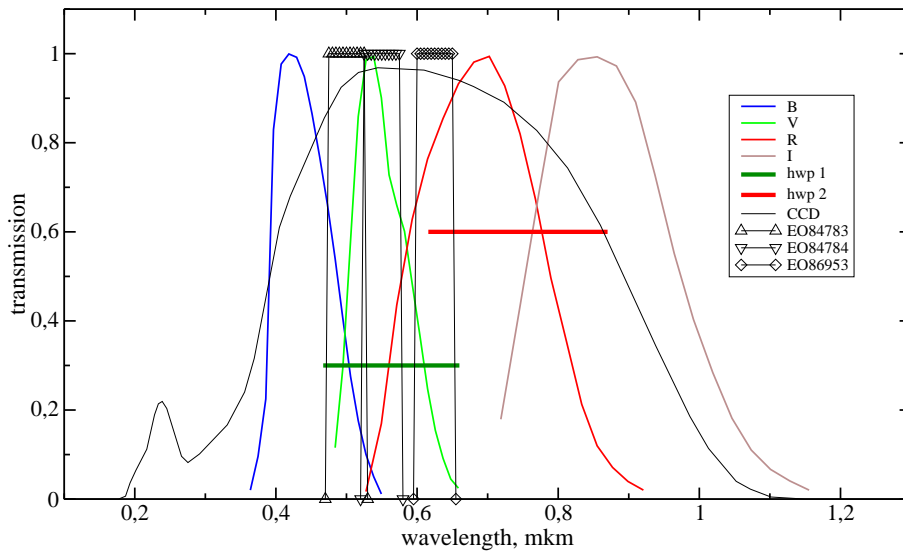


Рис. 4: Полосы пропускания фильтров *BVRI* и интерференционных фильтров. Полосы номинальные, не измеренные. Тонкая черная линия — кривая квантовой эффективности ПЗС, также из сопутствующего документа. Горизонтальные полосы — номинальные рабочие диапазоны используемых полуволновых пластинок.

вершины объектива 180 мм (полная длина параллельного пучка). Как видно из оптической схемы, запас по ширине оптических элементов в задней части параллельного пучка не так велик, около 1 мм, и существует опасность виньетирования. Положением коллиматора в плоскости, перпендикулярной оптической оси можно управлять и таким образом ликвидировать виньетирование. Метод проверки наличия/отсутствия последнего описан в разделе 3.

Собственное число Штреля всей системы телескоп+прибор в обоих лучах поляриметра и во всех точках поля зрения >0.95 .

2.4 Фильтры

Спектральная полоса формируется светофильтрами. В качестве фильтров используются: стандартные астрономические *BVRI* фильтры Бесселя, производство Asahi Spectra, диаметр 25.4 мм и три интерференционных фильтра полушириной 50 нм и центрированные на 500, 550 и 625 нм производства ЕО (арт. 84-783, арт. 84-784, арт. 86-953) диаметром 25 мм, полосы см. на рис. 4. Для последних относительная полуширина $\Delta\lambda/\lambda \approx 0.1$, что в 3-4 раза больше, чем ожидаемое для 2.5-м телескопа отношение $r_0/D = 0.043$ [13]. Данное соотношение близко к оптимальному для реализации спекл-интерферометрии (требование 1с). Контраст спеклов и сигнал в спектре мощности падает еще незначительно по сравнению с монохроматическим случаем и в тоже время фильтр пропускает достаточно много света [14]. Фильтры установлены в специально изготовленном колесе-турели, которое закреплено на моторизованном вращающемся столике Standa 8MR174-11-28, привод — червячная пара.

Лабораторное исследование [15] показало, что фильтры не показывают обнаружимого двулучепреломления.

2.5 Детектор

В качестве детектора применяется ПЗС-матрица с электронным усилением Andor iXon+897. Детектор имеет размеры 512×512 пикселей, размер пикселя 16 мкм, таким образом линейный размер детектора 8.19×8.19 мм. На небе это соответствует $10.56 \times 10.56''$. Скорость считывания 10 МГц, возможно считывание в режиме кадрового переноса. При считывании полного окна без биннинга достигается темп получения кадров 35 шт в секунду, что соответствует экспозиции 28.6 мс. Такая экспозиция в несколько

раз больше типичного атмосферного времени когерентности на месте установки 2.5-м телескопа [13], что находится в соответствии с требованием 1b.

Данный детектор также имеет весьма высокую квантовую эффективность — более 90% в диапазоне от 480 до 710 нм и более 50% в диапазоне от 380 до 890 нм, см. кривую на рис. 4. Уровень темного тока по нашим измерениям пренебрежимо мал [6]. Технология электронного усиления позволяет эффективно сделать шум считывания менее $1e^-$, так что им также можно пренебречь. Однако это достигается ценой двукратного увеличения фотонного шума. Главным шумовым фактором остается СИС-шум, присутствующий во всех ПЗС, однако становящийся заметным только при наличии электронного усиления. СИС-шум проявляется как однофотонные события равномерно распределенные по детектору. При бининге 1×1 среднее число событий составило 13000 на кадр по измерениям выполненным в октябре 2015, методика изложена в [6].

2.6 Компенсатор атмосферной дисперсии

Компенсатор атмосферной дисперсии состоит из двух одинаковых призм прямого зрения производства RIVoptics. Каждая призма представляет собой склейку из двух призм сделанных из стекла марки Ф1 и плавленного кварца. Углы при вершинах подобраны так, чтобы с одной стороны результирующая угловая дисперсия хорошо аппроксимировала дисперсию атмосферы, а с другой — пучок не отклонялся слишком сильно после прохождения призмы, подробнее см. [16]. Призмы независимо вращаются приводами вращения Standa 8MR151-1, углы поворота рассчитываются в реальном времени на основе координат объекта и угла поворота деротатора, получаемых от управляющей программы телескопа OCS. В итоге возможна компенсация атмосферной дисперсии в любой точке неба на высотах более 19° и при любой ориентации прибора относительно телескопа. Компенсатор ликвидирует падение контраста спекл-картины вызываемое атмосферной дисперсией (требование 1d), однако в тоже время он приводит к различию в угловом масштабе вдоль перпендикулярных осей и искажает измерения поляризации.

2.7 Лучерасщепляющий элемент

Для реализации двухлучевой поляриметрии в оптической схеме присутствует лучерасщепляющий элемент (требование 2a) — призма Волластона, производство RIVoptics, материал кварц. Она отклоняет горизонтально и вертикально поляризованные лучи в разные стороны. Призма Волластона установлена последней в параллельном пучке чтобы минимизировать различие в оптических путях пучков, соответствующих горизонтальной и вертикальной поляризации. Заметим, что установить ее в сходящемся пучке после объектива нельзя из-за возникающего при этом значительного дифференциального астигматизма. Реализующееся разделение пучков в пикселях зависит от длины волны, по измерениям оно составляет 248.8, 244.1, 241.2, 236.2 пкс для фотометрических полос *BVRI*, соответственно.

Чтобы исключить перекрытие горизонтально и вертикально поляризованных изображений в первичной фокальной плоскости установлена диафрагма поля, представляющая собой щель 0.5×5 мм (EO 39-907). На небе это соответствует $5.16 \times 51.6''$. В итоге расчетное поле зрения прибора $5.16 \times 10.56''$. Диафрагма установлена на двухкоординатной подвижке типа ласточкин хвост Standa 7T25-10XY, которая позволяет фокусировать ее и двигать в направлении, перпендикулярном щели. Также предусмотрена юстировка по наклону щели.

2.8 Полуволновая пластинка

Полуволновая пластинка (HWP) — это оптический элемент, который вносит задержку фазы в размере π радиан между ортогонально поляризованными пучками, проходящими через него. Эффективно это приводит к повороту плоскости поляризации излучения на удвоенный угол между направлением быстрой оси пластинки и осью OX. Таким образом, вращая HWP можно управлять углом поворота плоскости поляризации входящего излучения, *модулируя* его (требование 2b). Для поляриметров эта возможность чрезвычайно ценна, т.к. позволяет менять местами изображения на детекторе, соответствующие горизонтальной и вертикальной поляризации, что в свою очередь дает возможность

избавиться от инструментальных эффектов, возникающих позже HWP. В дальнейшем к изображениям, полученным таким способом применяется, например, метод двойной разности, см. например [17]. Отметим, что поворачивая HWP на угол 22.5° и 67.5° , можно и нужно измерять также и безразмерный параметр Стокса u , в дополнение к q и таким образом получать полную информацию о линейной поляризации излучения. Дифференциальный характер измерений, полученных с вращающейся HWP, также играет большую роль при реализации метода спекл-интерферометрии [5, 10].

Во время активной фазы разработки макета, а потом и прибора, мы не нашли на рынке в свободной продаже полуволновых пластинок, с диапазоном, соответствующим рабочему диапазону прибора — от 400 до 900 нм. Поэтому было принято решение использовать две пластинки ЕО арт. 49-227 и арт. 49-228, первую условно будем называть “зеленая”, а вторую — “красная”. По спецификациям эти пластинки имеют вариации задержки фазы не более 0.06 рад в пределах от 485 до 630 нм и от 630 до 835 нм, соответственно, эти диапазоны показаны на рис. 4. Для определения возможности использования имеющихся HWP для прецизионной поляриметрии нами было выполнено специальное лабораторное исследование, в котором HWP исследовались в сочетании с используемыми светофильтрами [15]. Было показано, что зеленая HWP может быть использована с фильтрами *BVR* и всеми тремя интерференционными фильтрами, а красная — с фильтром *I*. Заметим, что возможность использовать фильтр *I* весьма привлекательна для решения астрофизических задач, также в этом фильтре эффекты атмосферной турбулентности меньше по сравнению с *BVR*.

Для управления позиционным углом HWP мы используем привод вращения Standa 8MRU на ременной передаче. Максимальная допустимая скорость для него $1200^\circ/\text{сек}$, что намного больше, чем для червячной пары.

При работе с макетом спекл-поляриметра на 70-см телескопе был обнаружен дополнительный шум поляроастрометрического сигнала, который может объясняться вариациями задержки фазы и ориентации быстрой оси HWP по ее площади [10]. Лабораторное исследование показало, что для зеленой HWP эти вариации действительно имеют место быть на ожидаемом уровне. Их влияние предположительно можно минимизировать путем центровки оси вращения HWP в выходном зрачке телескопа

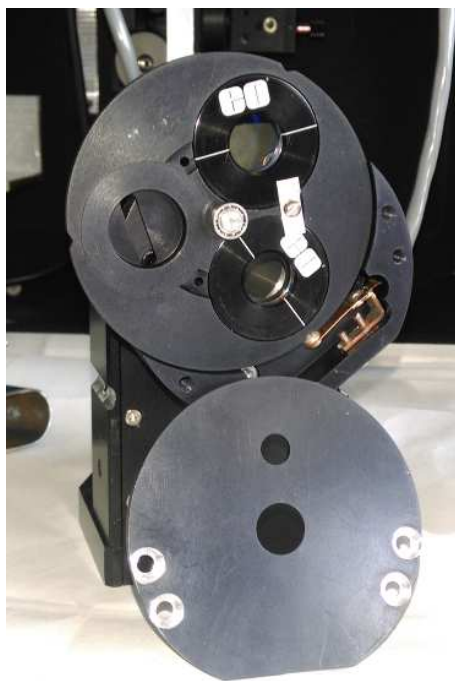


Рис. 5: Узел вращения HWP. Видна турель, в которой установлены две полуволновые пластинки и юстировочное приспособление для центровки вращателя в выходном зрачке. На этом фото нижняя правая HWP находится в пучке и вращение осуществляется около нее.

с точностью 0.1 мм. Первым условием для реализации такой центровки является установка HWP в плоскости выходного зрачка, только в этом случае центровка не будет зависеть от положения объекта в поле зрения. Естественно также должна соблюдаться стабильность взаимного положения коллиматора и оси вращения HWP. Для этого оба эти узла смонтированы на структуре, называемой внутренней фермой, которая закреплена на переднем фланце, это по замыслу должно уменьшать влияние гнуптия всего прибора в целом на центровку.

Сама центровка осуществляется с помощью ручного двухкоординатного транслятора Standa 7T273-10T, на котором смонтирован привод вращения HWP. Процедура выполняется (см. подраздел 3) при установленном вместо (или в дополнение к) HWP юстировочном приспособлении, которое представляет собой ножевую диафрагму, делящую зрачок пополам. Модуляция потока, возникающая при его вращении в пучке, позволяет определить величину и направление децентровки.

Из всего сказанного очевидно, что кроме вращения HWP конструкция должна обеспечивать возможность их автоматической смены. Это реализуется с помощью небольшой турели на три позиции, закрепленной на приводе вращения HWP (см. фото 5). Турель фиксируется в одном из трех положений с помощью пружинного фиксатора. При переключении к краю оправки турели подводится шток актюатора (на фото не показан), затем привод HWP поворачивается и турель под действием актюатора переключается. Эта автоматизация была отлажена в начале января и начиная с сессии 5С переключение пластинок производится автоматически.

2.9 Линейный поляризатор

Во время непрерывного вращения HWP, которое применяется в режиме быстрой поляриметрии, технически невозможно измерять и записывать угол полуволновой пластинки для каждого получаемого кадра. Тем не менее знать его нужно (требование 2b). Для этого в начале и конце серии с помощью подвижного зеркала на некоторое время в пучок вводится линейный поляризатор. Это делает излучение объекта полностью линейно поляризованным с известным углом поляризации (который определяется в специальном эксперименте, см. 2.12). Соответственно из измерений потока в изображениях, получаемых с двухлучевым поляриметром, становится возможно извлечь угол поворота полуволновой пластинки. Далее, предполагая, что скорость вращения пластинки и темп получения кадров строго постоянны, мы вычисляем угол поворота пластинки для остальных кадров, т.е. для тех, которые были получены без линейного поляризатора.

В качестве линейного поляризатора мы используем полиэтиленовую пленку с заваренными в нее алюминиевыми нитями ЕО арт. 33-082. Лабораторное исследование [15] показало, что поляризатор хорошо работает для фотометрических полос *BVRI* и его позиционный угол не зависит от длины волны.

2.10 Источник света

Для юстировки прибора и его отладки в лабораторных условиях крайне полезно использовать источник света, имитирующий звезду, для экономии рабочего времени телескопа (требование 4). Поскольку соответствующие процедуры предполагается делать регулярно в том числе и когда прибор смонтирован на телескопе, этот источник должен входить в его состав, что и было реализовано.

В качестве собственно источника излучения был взят сверхяркий белый светодиод Betlux VL-L324UWC, который мы запитали через переменный резистор от TTL выхода одного из контроллеров (управляющего актюатором подвижного зеркала). Спектральная характеристика данного светодиода позволяет видеть его на детекторе во всех фильтрах. Диод установлен вплотную к диафрагме диаметром около 0.1 мм, сделанной иглой в фольге. В положении подвижного зеркала “подсмотр введен” после двух отражений изображение диафрагмы переставляется в первичную фокальную плоскость прибора с помощью двухлинзового ахромата ЕО F=5 мм D=20 мм арт. 49-302-INK с уменьшением 6.6 раз.

2.11 Вспомогательная камера

Как уже было сказано, нельзя ожидать, что 2.5 м телескоп сможет во всех случаях попасть звездой в поле зрения прибора, которое сравнительно мало (требование 3). Поэтому мы предусмотрели возможность направления света от телескопа на вспомогательную CMOS камеру The imaging source DFK ECU010-M12. Для увеличения поля зрения также применяется переброска ЕО арт. 43-997 1:1.5. Диагональ поля зрения подсмотра оказывается $98''$. Единственным преимуществом данного детектора является его цена, она низкая. В остальном он плох: он маленький, цветной и у него нельзя увеличить экспозицию. Практическая предельная величина составляет $V = 11.5$.

2.12 Соглашения по координатам

Инструментальная система координат для астрометрии задается ориентацией строк ПЗС (см. рис. 6). Ось X направлена вдоль направления увеличения номера колонки при считывании через регистр электронного усиления. Обратите внимание, что считывание через “обычный” усилитель производится в другом направлении. При обработке скриптами `mfscrog` отражение оси X в этом случае производится автоматически.

При наблюдениях `session5B` прибор был смонтирован на деротаторе, который отслеживал вращение поля при ведении. Таким образом угол между осью X и направлением на северный полюс мира (NCP)

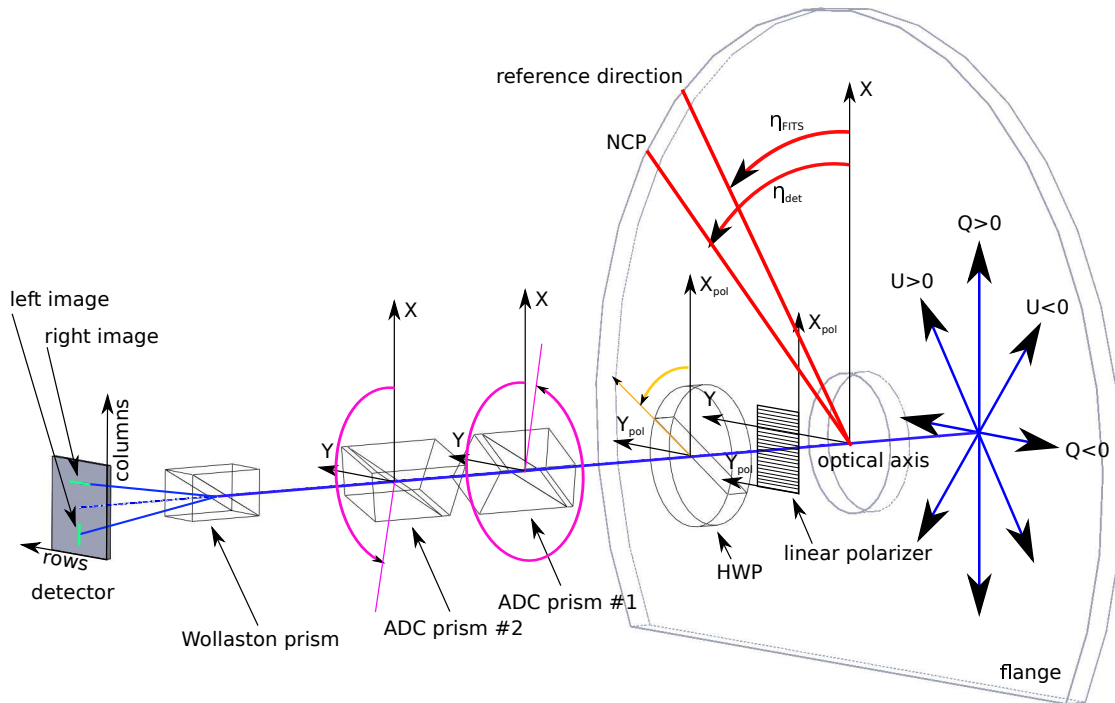


Рис. 6: Схема, иллюстрирующая системы координат, используемые в данном документе. Оси OX и OY заданы детектором, а OX_{pol} и OY_{pol} — линейным поляризатором, на практике могут не совпадать, однако угол между ними мал, подробнее см. текст. Компоненты слева направо, так, как установлены в приборе. Детектор, зеленым показаны два изображения, формируемые призмой Волластона, и их поляризация. Призмы компенсатора дисперсии, вторая и первая. Фиолетовые линии — направления дисперсий, увеличение длины волны. Полуволновая пластинка, оранжевая линия — направление быстрой оси. Передний фланец прибора, красным отмечены базовые направления для определения позиционного угла детектора. Направление “reference direction” для поляриметра другое (однако на практике оно весьма близко к тому направлению для детектора), здесь не отображено. Знаки параметров Стокса, привязка к осям OX_{pol} и OY_{pol} .

был постоянен на протяжении серии, обозначим его η_{det} . Данный угол может быть восстановлен для серии из угла η_{FITS} , который записан в header'e FITS-файла под ключом PLATEPA:

$$\eta_{\text{det}} = \eta_{\text{FITS}} + \Delta\eta_{\text{det}}. \quad (1)$$

Угол η_{FITS} вычисляется в управляющей программе прибора как сумма текущего угла деротатора и константы, заданной в конфигурационном файле, и также записанной в header FITS-файла под ключом REFERPA. Эта константа подобрана так, чтобы поправка $\Delta\eta_{\text{det}}$ была мала, ожидается в пределах $\pm 5^\circ$. Заметим, что $\Delta\eta_{\text{det}}$ постоянна в пределах сессии, пока ориентация прибора относительно телескопа постоянна. Она должна быть специально измерена путем наблюдения ансамбля двойных звезд с известным позиционным углом.

Инструментальная система координат для поляриметрии задается линейным поляризатором, вводимого в пучок для определения угла поворота полуволновой пластинки, см. подраздел 2.9. Ось X_{pol} направлена перпендикулярно направлению пропускаемой поляризации (см. рис. 6). Эта ось близка к X , заданной детектором, однако не совпадает с ней, что существенно для прецизионной поляриметрии и для поляроастрометрии. Для перевода измерений в небесную систему координат нужен угол между X_{pol} и направлением на НСР, обозначаемый η_{pol} и вычисляемый следующим образом:

$$\eta_{\text{pol}} = \eta_{\text{FITS}} + \Delta\eta_{\text{pol}}. \quad (2)$$

Поправка $\Delta\eta_{\text{pol}}$ также должна быть измерена один раз в сессию. Это может быть сделано путем наблюдения сумеречного неба, направление поляризации которого с достаточной точностью перпендикулярно направлению на Солнце. В сессию 5В такие наблюдения выполнить не удалось, поэтому мы оценим $\Delta\eta_{\text{pol}}$ с небольшой точностью — около 0.5° , что не столь принципиально из-за другого эффекта, не позволяющего выполнить оценку угла поляризации с большей точностью.

Преобразование позиционных углов двойных звезд, оцененных в системе отсчета детектора следует осуществлять по формуле:

$$\theta_{\text{equ}} = \theta_{\text{det}} - \eta_{\text{det}}. \quad (3)$$

А углов поляризации, соответственно:

$$\chi_{\text{equ}} = \chi_{\text{det}} - \eta_{\text{pol}}. \quad (4)$$

При монтаже в фокус Нэсмит-2 прибор жестко фиксируется так, чтобы ось OX была направлена по возможности вертикально. В этом случае ориентация детектора относительно небесной сферы будет зависеть только от времени, координат объекта и некоторой поправки. Преобразование позиционных углов двойных звезд при этом будет выглядеть так:

$$\theta_{\text{equ}} = -\theta_{\text{det}} + \psi - h + 180 + \Delta\eta_{\text{det}}, \quad (5)$$

где ψ — паралактический угол, отсчитываемый от направления на полюс до направления на зенит против часовой стрелки, h — высота светила. η_{det} — поправка, постоянная на протяжении серии, должна быть оценена по ансамблю двойных звезд. Обратите внимание, что угол θ_{det} входит в это уравнение со знаком минус, т.к. число отражений нечетное и изображение на детекторе отражено.

Призма Волластона по возможности съюстирована по позиционному углу так, чтобы линия, соединяющая изображения была параллельна OX . Привязка к направлению этой линии не осуществляется, т.к. есть подозрение, что именно она вызвала смещение угла поляризации в экспериментах по поляриметрии на АЗТ-2.

3 Сборка и юстировка прибора

3.1 В лаборатории

Компоновка прибора довольно плотная поэтому юстируется он по мере сборки. Некоторые юстировочные степени свободы трудно-доступны или совсем недоступны в собранном состоянии. Последовательность сборки такова:

1. Собрать корпус кроме переднего фланца.
2. Смонтировать детектор (как на рис. 6!). Смонтировать объектив на фокусировочной подвижке.
3. Сфокусировать объектив на бесконечность. Производится по звезде путем направления собираемого прибора в открытое окно (ночью). Вблизи фокуса видно звезды до ≈ 4 величины.
4. Установить призму Волластона на своем креплении (Как на рис. 6! Стрелка на боковой поверхности призмы указывает направление распространения света.)
5. Собрать внутренней рельс на фланце.
6. Собрать блок подвижного зеркала: подвижное зеркало на тяни-толкае, переброска источника, линейный поляризатор. Ориентация линейного поляризатора как на рис. 6, с точностью $\pm 2^\circ$, точнее вряд ли получится.
7. Смонтировать калибровочный источник, подсмотр, коллиматор на внутреннем рельсе. Коллиматор задиафрагмировать до 2.5 мм.
8. Установить фланец вместе со всеми ранее размещенными на нем компонентами.
9. Установить блок электроники, смонтировать в нем USB концентратор, контроллеры, регулятор яркости источника.
10. Выставить подвижное зеркало в положение “подсмотр введен” по чертежам.
11. Используя тяни-толкай подвижного зеркала и зеркала источника найти изображение источника на детекторе. Сфокусировать его.
12. Убедиться в отсутствии виньетирования (грубо). Двигая источник тяни-толкаем по полю проверить что его яркость постоянна по полю. Если есть виньетирование — смещаем коллиматор.
13. Юстировать призму по позиционному углу так, чтобы изображения встали с точностью $\pm 0.3^\circ$ вдоль строки детектора.
14. Смонтировать полуволновые пластинки и юстировочное приспособление в колесе HWP. Собрать блок вращения HWP, центрировать:
 - (a) Установить юстировочное приспособление.
 - (b) Получить серию в режиме `HWPMode step` при шаге 90° .
 - (c) Обработать данные скриптом `/Camera/Processing/alignment/stage5Acollim/quad.m`
 - (d) Скрипт выдает результат в виде смещений X и Y .
 - (e) Смещения устраняются микрометрическими винтами двухкоординатной подвижки, на которой установлен блок вращения HWP. Соответствие координат см. на рис. 2. Обратите внимание, что эти координаты не соответствуют системе координат, заданной на рис. 6! Положительное направление по часовой стрелке.
15. Смонтировать колесо фильтров.
16. Установить фильтры. Определить положение привода вращения для каждого фильтра, результат записать в файл конфигурации.
17. Собрать компенсатор атмосферной дисперсии (ADC), установить призмы как рис. 6.
18. Определить опорные углы призм ADC.
 - (a) Установить в файле конфигурации `ADCMotor1Intercept 0` и `ADCMotor2Intercept 0`.
 - (b) Поставить призмы на угол 0. Перезапустить программу без второй призмы (ключ -b).

- (с) Двигая первую призму шагами (режим `ADCMode step`) получить две серии с интерференционными фильтрами 500 и 625. Используя скрипт `Camera/Processing/alignment/stage5Acollim/adc/fw` определить положение в котором дисперсия становится максимальной. В этом положении вектора угловой дисперсии призм сонаправлены. Соответствующую разность углов запомнить в энергонезависимой памяти.
- (d) Запустить программу с обоими призмами. Поставить призмы так, чтобы их дисперсии стали сонаправлены.
- (e) Далее двигать обе призмы шагами, получить две серии с интерференционными фильтрами. Определить углы призм, при которых суммарная дисперсия призм становится направленной вдоль положительного направления оси OX (см. рис. 6).
- (f) Эти углы и являются опорными углами приводов. Перевести их в шаги двигателей (путем умножения на 100) и занести в файл конфигурации в переменные `ADCMotor1Intercept` и `ADCMotor2Intercept`.
- (g) Перезапустить программу. Теперь углы призм задаются в системе координат прибора.

19. Смонтировать диафрагму поля на юстировочном приспособлении.
20. Освещая диафрагму поля рассеянным светом, съюстировать ее: Сфокусировать, грубо сцентрировать, выставить края вдоль направления OY , точно сцентрировать.
21. Определить параметры разделения изображений призмой Волластона для разных фильтров при помощи скрипта `/Camera/Processing/mfcpoc/alignment/inspectOpticsLab.m`
22. Убрать диафрагму коллиматора.

Дальнейшие юстировочные процедуры требуют пучка от телескопа.

3.2 На телескопе

1. Днем: смонтировать прибор на телескопе. При монтаже в Кассегрене (порт C1) ориентировать прибор так, чтобы при угле деротатора 153.5° ось OX была направлена на зенит (не строго). Тем не менее по возможности оценить более точно реальный угол деротатора при упомянутой ориентации системы координат прибора. Вычесть этот угол из 360° и занести в файл конфигурации в переменную `referencePA`. Это нужно для ADC, а также для грубой оценки позиционного угла камеры (который пишется в FITS-header). При монтаже в Нэсмите N2 без деротатора ориентировать так, чтобы ось OX была направлена на зенит (не строго).
2. Дальнейшие действия ночью. Призмы ADC направить друг против друга. HWP поставить любую из двух.
3. Навестись на яркую звезду. Грубо сфокусировать, сцентрировать на бумажке. В Кассегрене положение фокуса `tranz=9.15`. Найти звезду на детекторе.
4. Точно сфокусировать и сцентрировать телескопом. Запомнить в энергонезависимой памяти смещение.
5. Поставить подвижное зеркало в положение “подсмотр введен”. Грубо сцентрировать камеру подсмотра используя тяни-толкай подвижного зеркала. Сфокусировать камеру подсмотра. Точно сцентрировать камеру подсмотра.
6. Грубо сцентрировать источник в поле используя его тяни-толкай. Сфокусировать источник. Точно сцентрировать источник.
7. Поставить подвижное зеркало в положение “подсмотр выведен”.
8. Перемещая звезду по полю грубо определить отсутствие виньетирования.

9. Навестись на двойную звезду. Оценить отношение блеска в разных местах поля. Таким образом более точно установить отсутствие виньетирования.
10. Центрировать HWP в зрачке. Для этого навестись на звезду 5-6 величины и повторить процедуру из п. 14 предыдущего подраздела.

По выполнении этих пунктов прибор съюстирован и готов к наблюдениям. Юстировка довольно стабильна и сохраняется на протяжении сессии. Исключением является последний пункт, центровку HWP необходимо проверять в начале и конце каждой ночи.

Заметим, что для успешной редукции данных необходимо также выполнить ряд *калибровочных* измерений, которые описаны отдельно.

4 Обнаруженные проблемы и планируемые изменения

Стабильность коллиматора При испытаниях session5B выяснилось, что стабильность подвижки Standa 5TLM в которой закреплен коллиматор оставляет желать лучшего. При изменении ориентации прибора в пространстве смещение может достигать 50-100 мкм, происходит скачком и назад не возвращается. Также заподозрено, что из-за наличия пружины в подвижке она также смещается при изменении ориентации прибора в пространстве. *Действия:* предлагается добавить фиксирующий винт. *Выполнение:* март 2016.

Двулучепреломление призм компенсатора атмосферной дисперсии Наблюдения поляризационных стандартов показали большое отличие 2-10% измеряемой доли поляризации от ожидаемой. Это отличие находится далеко за пределами ожидаемой точности поляриметрии. Ошибка воспроизводится и зависит от угла поворота призм ADC. Естественным образом возникло предположение что эффект связан с двулучепреломлением в них. Простой эксперимент с осмотром призм через скрещенные линейные поляризаторы подтвердил эту гипотезу (см. рис. 7). Судя по картине в призмах имеется напряжение, зависящее от температуры. Скорее всего это связано с тем, что материалы, из которых изготовлены призмы обладают сильно отличающимися коэффициентами теплового расширения (КТР). Так, стекло Ф1 имеет КТР 7.2×10^{-6} а кварц 0.5×10^{-6} . *Действия:* переделать призмы, заменив кварц на стекло со схожими свойствами, но с большим КТР. На эту роль хорошо подходит стекло К8, имеющее КТР 7.4×10^{-6} . *Выполнение:* март 2016.

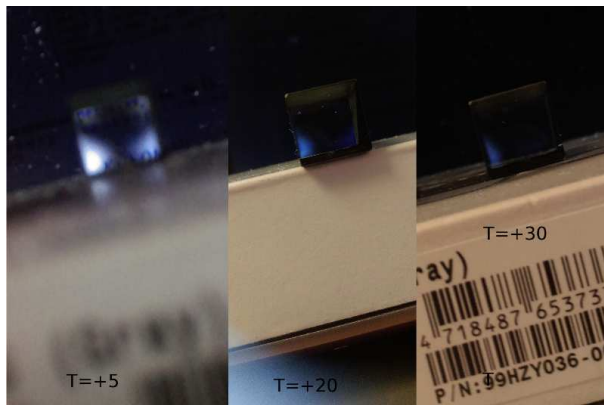


Рис. 7: Призма ADC освещенная линейно поляризованным светом и осматриваемая через ориентированный перпендикулярно линейный поляризатор. В отсутствие двулучепреломления мы увидели бы темное поле. Однако видно, что имеются светлые пятна, яркость которых возрастает с понижением температуры.

Чувствительность веб-камеры подсмотра Веб-камера подсмотра позволяет наводиться на объекты ярче 11-12 величины. Эта граница более-менее совпадает с предельной величиной прибора в режимах спекл-интерферометра, спекл-поляриметра и быстрого фотометра. Однако поляриметрия возможна для более слабых объектов. Также имеющаяся веб-камера требует для работы дополнительного ethernet-удлинитель USB, что не технологично. Необходимо заменить веб-камеру подсмотра на более чувствительную индустриальную ПЗС с интерфейсом ethernet. *Действия:* Закупить веб-камеру. *Выполнение:* март 2016.

Скорость движения подвижного зеркала При монтаже подвижного зеркала в октябре 2015 для надежного прижима каретки к актюатору потребовалось натянуть пружину довольно сильно. Актюатору стало тяжело ее тянуть и пришлось уменьшить скорость его движения. Теперь ввод посмотра занимает 2 минуты, что непозволительно много. *Действия:* убрать пружину и соединить шток актюатора с кареткой плотной резиной. Это позволит, с одной стороны, сделать так, чтобы актюатор *тянул* каретку за собой, а с другой — не слишком увеличит люфт. *Выполнение:* март 2016.

Приспособление для фокусировки Изрядную трудность представляет фокусировка прибора на телескопе, довольно критичная для достижения высокого соотношения сигнал-шум в пространственном спектре объекта. *Действия:* Придумать какой оптический элемент установить в выходном зрачке для проверки параллельности пучка. Желательно совместить его с центровочным приспособлением. *Выполнение:* май 2016. Добавление, февраль 2016 — возможно, обойтись обработкой “налету” изображений с главного детектора с оценкой контраста и автоматической фокусировкой.

Список литературы

- [1] Сафонов, Б., “Анализ методов увеличения углового разрешения 2.5-м телескопа по данным измерений оптической турбулентности на месте его установки (диссертация на соискание степени кандидата физ.-мат. наук),” (Feb. 2013).
- [2] Safonov, B. S., “Adaptive optics performance simulation on the basis of MASS/DIMM data obtained on Mt. Shatdzhatmaz in 2009–2011,” in [*Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*], *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series* **8447** (July 2012).
- [3] Safonov, B. S., “Lucky image performance simulation on the basis of optical turbulence data obtained on Mt. Shatdzhatmaz,” in [*Advances in Astronomy and Space Physics, Proceedings of the 17th Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics, held in Kyiv, Ukraine, April 26 - May 1, 2010, Eds.: Choliy V., Ivashchenko G., Ivaniuk O., Kyivskiy Universytet, Kyiv, p. 102-105*], V. Editors: Choliy, G. Ivashchenko, & O. Ivaniuk, ed., 102–105 (Jan. 2011).
- [4] Сафонов, Б., “Спекл-интерферометрический обзор,” (Sept. 2010).
- [5] Safonov, B., “Performance Analysis of Differential Speckle Polarimetry,” *Astronomy Letters* **38**, 1–16 (Apr. 2013).
- [6] Сафонов, Б., “Исследование EMCCD детектора URL:http://dragon.sai.msu.ru/~safonov/CCD_report.pdf,” (Oct. 2012).
- [7] Сафонов, Б., Черясов, Д., and Горбунов, И., “Исследование EMCCD детектора с точечным источником света URL:http://lnfm1.sai.msu.ru/kgoinstruments/mfc/CCD_point.pdf,” (May 2013).
- [8] Сафонов, Б., “Спекл-интерферометрические наблюдения на телескопе АЗТ-2 с EMCCD детектором URL:<http://lnfm1.sai.msu.ru/kgoinstruments/mfc/Speckle1.pdf>,” (Jan. 2014).
- [9] Сафонов, Б., “Поляриметрия полного потока на АЗТ-2,” (May 2014).

- [10] Safonov, B., “Visible light polaroastrometry of astronomical objects,” *ArXiv e-prints* (Jan. 2015).
- [11] Rautela, B. S., Joshi, G. C., and Pandey, J. C., “ARIES imaging polarimeter.,” *Bulletin of the Astronomical Society of India* **32**, 159 (Sept. 2004).
- [12] Hough, J. H., Lucas, P. W., Bailey, J. A., Tamura, M., Hirst, E., Harrison, D., and Bartholomew-Biggs, M., “PlanetPol: A Very High Sensitivity Polarimeter,” *Publications of the ASP* **118**, 1302–1318 (Sept. 2006).
- [13] Kornilov, V., Safonov, B., Kornilov, M., Shatsky, N., Voziakova, O., Potanin, S., Gorbunov, I., Senik, V., and Cheryasov, D., “Study on Atmospheric Optical Turbulence above Mount Shatdzhatzmaz in 2007-2013,” *Publications of the ASP* **126**, 482–495 (May 2014).
- [14] Tokovinin, A. A., [*Zvezdnye interferometry (Stellar interferometers).*] (1988).
- [15] Лысенко, П., “Измерение неточности оптических элементов поляриметра,” (Oct. 2015).
- [16] Сафонов, Б., “Компенсатор атмосферной дисперсии спекл-поляриметра 2.5-м телескопа,” (Sept. 2015).
- [17] Bagnulo, S., Landolfi, M., Landstreet, J. D., Landi Degl’Innocenti, E., Fossati, L., and Sterzik, M., “Stellar Spectropolarimetry with Retarder Waveplate and Beam Splitter Devices,” *Publications of the ASP* **121**, 993–1015 (Sept. 2009).