

УДК 520.353

## ИЗМЕРИТЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ СТОКСА С РЕЗАТЕЛЕМ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2007 И. Д. Найденов, В. Е. Панчук, М. В. Юшкин

*Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия*

Поступила в редакцию 25 сентября 2006; принята в печать 3 октября 2006

Приведены оптическая схема, технические характеристики и описание принципа действия устройства для измерения четырех параметров Стокса. Прибор рассчитан для эшелле-спектрографа НЭС фокуса Несмит–2 БТА. Испытания устройства на телескопе показали, что выигрыш в проникающей способности по сравнению с анализатором на основе ромбов Френеля составляет 2.7 раза в красной области (5000 – 7000 Å) и 6 раз — в синей области (3500 – 4700 Å).

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Задачи исследования распределения поляризации в пределах профилей отдельных линий в спектрах различных объектов требуют применения спектрографов различной разрешающей способности. Поэтому была поставлена задача создания комплекса спектрополяриметрической аппаратуры, позволяющего выполнять исследования в широком диапазоне спектральных разрешений ( $R = 6000 - 60000$ ).

Сектрополяриметрический комплекс фокуса Нэсмит–2 БТА сконструирован нами так, что все три спектрографа, работающие в этом фокусе, имеют общую предщелевую часть [1]. Это позволяет использовать все предщелевые устройства с любым спектрографом. Конструкция может обеспечить работу одновременно с двумя приборами, а также быстрое переключение с одного спектрографа на другой. Оснащение эшелле-спектрографов анализаторами поляризации повысило эффективность спектрополяриметрических методов наблюдений как за счет увеличения числа одновременно регистрируемых элементов спектра  $N$ , так и за счет увеличения светосилы по потоку  $L$  при заданном спектральном разрешении  $R$ .

При развитии возможностей спектрополяриметрии в фокусе Нэсмит–2 мы стремились максимально повысить эффективность спектрополяриметрических измерений за счет повышения пропускания анализатора поляризации в широком диапазоне длин волн, особенно в коротковолновой области спектра. На БТА в течение длительного времени используется анализатор поляризации на основе ромбов Френеля [2]. Данный анализатор является неоптимальным при использовании с эшелле-спектрографами и не позволяет проводить

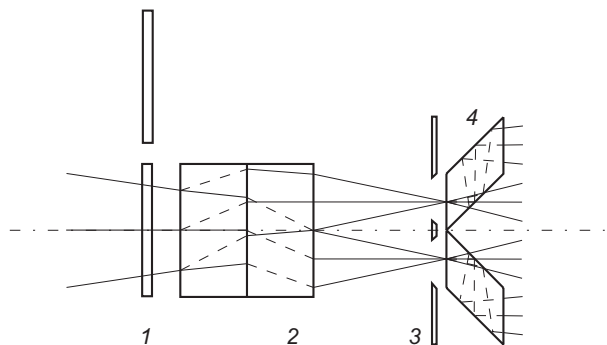
измерения линейной поляризации из-за наличия вращающегося диагонального зеркала телескопа. Нами была поставлена задача — разработать и внедрить анализатор поляризации с возможностью измерения 4-х параметров Стокса для эшелле-спектрографа НЭС фокуса Несмит–2 БТА, а также оптимизировать устройство для изображений вплоть до 4". Ниже приводятся описание конструкции и технические характеристики измерителя параметров Стокса с резателем изображения.

Представлены результаты исследования прибора. Проведен анализ некоторых его технических характеристик в сравнении с анализатором поляризации на основе ромбов Френеля. Описываемое устройство предназначено для измерения 4-х параметров Стокса в диапазоне длин волн 3500 – 7000 Å со спектральным разрешением до  $R = 60000$ . При измерении эффекта Зеемана устройство позволяет определять поперечную и продольную составляющие магнитного поля звезд.

### 2. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА И ПРИНЦИП РАБОТЫ ИЗМЕРИТЕЛЯ ПАРАМЕТРОВ СТОКСА С РЕЗАТЕЛЕМ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Конструкция НЭС [3] предусматривает смену узлов скрещенной дисперсии, что, в частности, позволяет применять резатель изображений, рассчитанный на небольшое число срезов. Мы решили оснастить НЭС резателем изображения, совмещенным с классическим анализатором Бэбкока [4]. Принцип действия резателя изображения, используемого на эшелле-спектрографе НЭС, описан в работе Панчука и др. [5]. Предложенная конструкция позволяет работать в длинноволновой области до 4100 Å с решеткой 300 штр/мм. Для более

коротковолновой области надо применять решетку 600 штр/мм.



**Рис. 1.** Оптическая схема анализатора поляризации с резателем изображения: 1 — входные вращающиеся фазосдвигающие пластинки  $\lambda/4$  и  $\lambda/2$ ; 2 — кристалл исландского шпата; 3 — двойной деккер; 4 — перебра- сывающие призмы резателя изображения.

На рис. 1 показана оптическая схема измерителя параметров Стокса с резателем изображения. Анализатор измерителя параметров Стокса работает в сходящемся пучке. Свет звезды, проходя через фазосдвигающую пластинку  $\lambda/4$  — в случае измерения круговой поляризации или  $\lambda/2$  — при измерении линейной поляризации, попадает на двухлучепреломляющий кристалл, расщепляющий изображение звезды в фокальной плоскости телескопа на две ортогонально поляризованные компоненты. Для симметричного разведения обыкновенного и необыкновенного луча относительно оптической оси телескопа двухлучепреломляющий кристалл склеен из двух половинок, развернутых относительно друг друга на  $90^\circ$ .

Входная щель спектрографа выполнена в виде двойного деккера и ее плоскость совмещена с плоскостью ромбовидных призм. Ширина их равна половине ширины деккера. Ромбы расположены так, что закрывают половину деккера с одной стороны. Свет звезды, прошедший через свободную половину деккера, проходит прямо в спектрограф. Свет, попавший на часть деккера, закрытую ромбовидной призмой, при прохождении через нее испытывает полное внутреннее отражение, в результате смещается и уже после этого попадает в спектрограф.

То же самое происходит при прохождении света через вторую половину деккера. В результате каждый порядок спектра представлен в виде четырех полосок — две в одной поляризации и две в ортогональной. Фазовые пластинки вращаются шаговым двигателем, управляемым ЭВМ по программе, которая компенсирует вращение поля телескопа при измерении линейной поляризации путем непрерывного поворота полуволновой пластинки или/и

дискретно поворачивает пластинку  $\lambda/4$  на  $90^\circ$  при измерении круговой поляризации, а пластинку  $\lambda/2$  — на  $22:5$ ,  $45^\circ$  и  $67:5$  при измерении линейной поляризации.

Применение резателя изображений позволяет повысить эффективность и точность измерений за счет перемешивания апертуры пучка в тонких призмах резателя изображений. Точность смещений, определяемых по крайним компонентам порядка (формируемым светом, прошедшим через призмы), на 10% выше определяемой по центральным компонентам порядка. Измерения были выполнены по 255-ти линиям в спектре звезды  $\alpha$  Per.

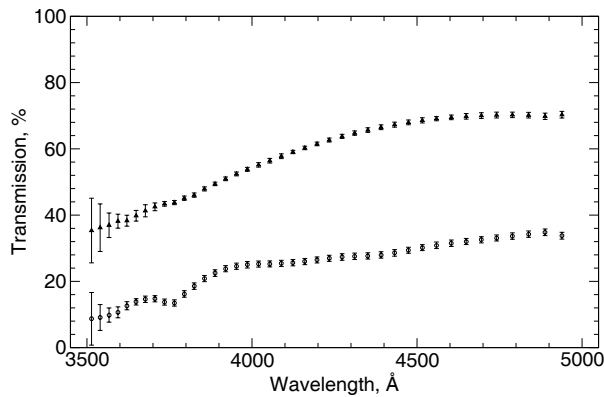
### 3. НЕКОТОРЫЕ СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШТАТНОГО АНАЛИЗАТОРА БТА (НА ОСНОВЕ РОМБОВ ФРЕНЕЛЯ) И АНАЛИЗАТОРА В ИЗМЕРИТЕЛЕ ПАРАМЕТРОВ СТОКСА С РЕЗАТЕЛЕМ ИЗОБРАЖЕНИЯ

#### Технические характеристики поляризационного устройства на основе ромбов Френеля:

1. Рабочий спектральный диапазон	4000 — 9000 Å
2. Линейная апертура	30 мм
3. Разведение поляризованных компонент на щели	5 мм
4. Пропускание	10 — 45 %
5. Время установки в рабочее положение	1 мин
6. Число необходимых экспозиций	1 — 5

#### Технические характеристики анализатора поляризации с резателем изображения:

1. Рабочий диапазон	3200 — 12000 Å
2. Расстояние между изображениями звезды	4.0 мм
3. Рабочее изображение звезды	$\leq 3''6$
4. Толщина кристалла	40 мм
5. Световой диаметр	30 мм
6. Пропускание в режиме измерения линейной и круговой поляризации	30 — 80%

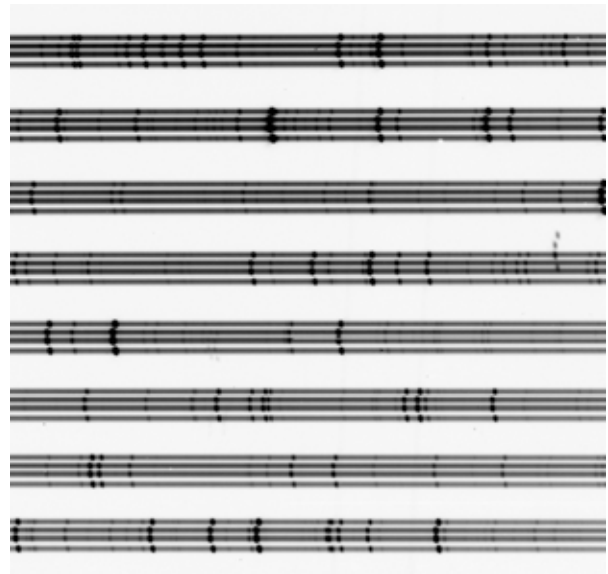


**Рис. 2.** Пропускание старого поляризационного устройства на основе ромбов Френеля (пустые кружки) и нового анализатора поляризации с резателем изображения (закрашенные треугольники). Пропускание анализаторов показано с учетом раздвоения спектральных порядков и без учета дополнительного выигрыша на спутниковых компонентах порядка в случае анализатора с резателем изображения.

На рис. 2 приведено пропускание старого поляризационного устройства на основе ромбов Френеля и нового анализатора поляризации с резателем изображения. При определении пропускания учитывалось раздвоение светового пучка и не учитывался почти двухкратный выигрыш на резателе изображения. При измерении пропускания анализатора с ромбами Френеля сравнивалась суммарная интенсивность компонент порядка в спектре с анализатором и интенсивность соответствующего порядка в спектре без анализатора. В случае нового анализатора с резателем изображения бралась только суммарная интенсивность центральных компонент порядка. Таким образом, пропускание нового анализатора с ахроматичными фазосдвигающими пластинками больше пропускания анализатора с ромбами Френеля в 2 раза в красном диапазоне и почти в 4 раза в синем диапазоне. Очевидно, что наличие дополнительных компонент порядка в случае применения нового анализатора в сочетании с резателем изображения дает существенный выигрыш в проникающей способности спектрографа НЭС в спектрополяриметрической моде по сравнению со старым вариантом наблюдений с анализатором на ромбах Френеля.

#### 4. МЕТОД ОБРАБОТКИ ЭШЕЛЛЕ-СПЕКТРОВ С РЕЗАТЕЛЕМ ИЗОБРАЖЕНИЙ

На рис. 3 показан фрагмент комбинированного спектра торий-аргоновой лампы с полым катодом и лампы непрерывного спектра в диапазоне длин волн 5000 – 5500 Å полученного на спектрографе НЭС с анализатором поляризации и резателем



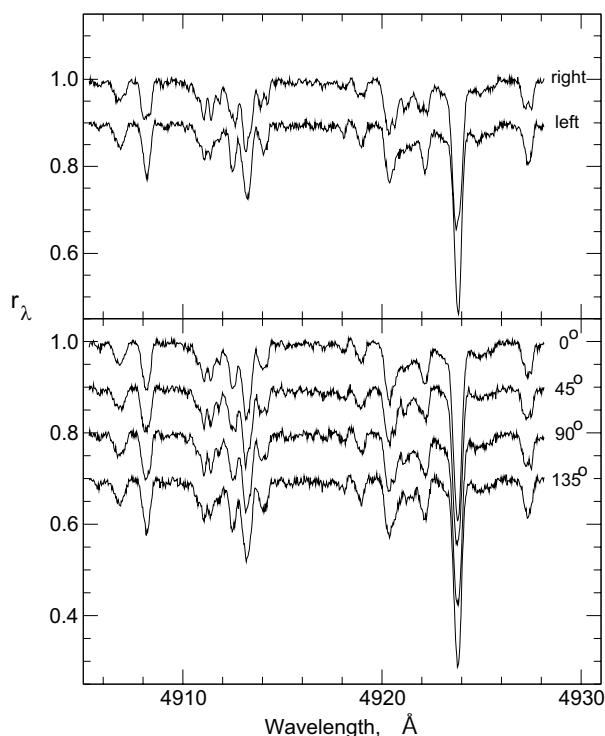
**Рис. 3.** Фрагмент ПЗС-кадра с изображением спектра торий-аргоновой лампы полого катода в диапазоне длин волн 5000 – 5500 Å, полученного на спектрографе НЭС с новым анализатором поляризации и резателем изображения (решетка 300 штр/мм).

изображения (решетка 300 штр/мм). Видно, что спутниковые компоненты спектральных порядков смещены почти симметрично относительно центральных вдоль дисперсии эшелле на величину, близкую к проекции ширины “щели”.

Для корректной экстракции спектров, полученных в спектрополяриметрическом варианте наблюдений с резателем изображения, был разработан и апробирован алгоритм на основе контекста ECHELLE-системы обработки ПЗС-изображений MIDAS. Первоначальная редукция включает следующие этапы: удаление столбцов и строк ПЗС-кадра, не участвующих в формировании изображения спектра; вычитание “нулевого” сигнала; удаление следов “космических частиц” путем медианного усреднения нескольких кадров с изображением спектра исследуемой звезды. Далее строится маска положения порядков с учетом их четырехкратного повторения. Маска представляет собой таблицу координат центральных компонент порядков, рассчитанных с определенным шагом вдоль направления дисперсии эшелле, и смещений в направлении, перпендикулярном дисперсии эшелле.

Процедура экстракции использует маску положения порядков, совмещенную с данным изображением спектра. Экстракция одномерных векторов из двумерного изображения эшелле-спектра осуществляется после процедуры вычитания фона путем усреднения отсчетов по высоте компоненты порядка.

Для вычисления фона используется таблица значений медианного среднего отсчетов в неболь-



**Рис. 4.** Фрагменты спектра  $\alpha^2$  CVn, полученного с новым анализатором поляризации. Четыре компоненты соответствуют четырем положениям ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $135^\circ$ ) главной оси анализатора линейной поляризации. Компоненты показаны со смещением по интенсивности.

шой окрестности узловых точек, расположенных посередине между порядками с заданным шагом вдоль порядков. Размер окрестности, по которой проводится медианное усреднение отсчетов, и расположение узловых точек могут меняться в зависимости от структуры фона. Медианное усреднение по небольшой окрестности применяется для исключения ошибки определения уровня фона в данной точке, вызванной попаданием космических частиц или дефектами ПЗС-матрицы. Окончательно двумерное изображение фона строится методом сплайн-интерполяции между узловыми точками.

Каждая компонента спектрального порядка экстрагируется отдельно, затем компоненты порядков суммируются с учетом их относительного сдвига по длинам волн. Сдвиг каждой сателлитной компоненты порядков вдоль дисперсии эшелле, вызванный конструктивными особенностями резателя изображения, определяется методом кросс-корреляции относительно центральной компоненты порядка по эмиссионному спектру ThAr-лампы полого катода, полученному также с резателем изображения. Подобный сдвиг может меняться от порядка к порядку для некоторых схем эшелле-спектрографов (РЫСЬ [6]), поэтому для каждого порядка относительное смещение

вдоль дисперсии эшелле определяется отдельно. Относительный сдвиг компонент порядков вдоль дисперсии эшелле позволяет более эффективно устранять не только следы космических частиц, но и различные дефекты ПЗС-матрицы (“горячие” элементы, “ловушки”, столбцы с нулевой чувствительностью), так как одни и те же спектральные детали в компонентах порядков приходятся на разные структурные элементы светоприемника.

Калибровка по длинам волн осуществляется по центральным компонентам порядков спектра ThAr-лампы с помощью стандартных процедур контекста ECHELLE.

На рис.4 показан фрагмент спектра звезды  $\alpha^2$  CVn, полученный в спектрополяриметрическом варианте наблюдений на спектрографе НЭС. Приведены шесть записей одного и того же спектрального порядка: на верхней панели — левополяризованная (left) и правополяризованная (right) составляющие; на нижней панели — четыре компоненты записи спектра при различной ориентации главных направлений анализатора линейной поляризации ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $135^\circ$  в инструментальной координатной системе). Заметно изменение формы профилей некоторых абсорбционных линий порядка. Подобной информации, совместно со спектрами стандартов, достаточно для получения 4-х параметров Стокса.

## 5. ВЫВОДЫ

Разработано и внедрено в практику наблюдений новое оптическое устройство, состоящее из анализатора поляризации и резателя изображения. Результаты испытаний устройства показали его высокую эффективность. Так, по сравнению со старым анализатором на основе ромбов Френеля, эффективность нового устройства по потоку возросла в среднем в 6 раз (от 3 до 9 раз в красном и УФ-диапазоне соответственно). Это означает, что при наблюдениях на 6-метровом телескопе стали доступными новые классы задач, трудноразрешимые с прежним анализатором, например, задача зеемановской спектрополяриметрии в наземном УФ-диапазоне, спектрополяриметрия быстроосциллирующих пекулярных звезд и задача зееман-доплеровского картографирования звездных атмосфер.

Внедрение нового устройства улучшает условия выполнимости перечисленных задач. В целом, появился еще один пример того, что создание перестраиваемых спектральных систем высокого разрешения в фокусе Нэсмит-2 БТА может быть полезным.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (проект 04-02-17564) и Фонда содействия отечественной науке.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. Е. Панчук, Н. А. Викульев, И. Д. Найденев, Препринт САО РАН №. 138. (1999).
2. И. Д. Найденев, Г. А. Чунтонов, *Астрофиз. Исслед.* (Изв. САО) **8**, 139 (1976).
3. В. Е. Панчук, Н. Е. Пискунов, В. Г. Клочкова и др., Препринт САО №. 169 (2002).
4. H. W. Babcock, in *Astronomical techniques*, Ed. by W. A. Hiltner (Univ. of Chicago Press, 1962)
5. В. Е. Панчук, М. В. Юшкин, И. Д. Найденев, Препринт САО РАН №. 179 (2003).
6. В. Г. Клочкова, С.В.Ермаков, В. Е. Панчук и др., Препринт САО РАН №. 152 (2001).

## STOKES-PARAMETER METER WITH AN IMAGE SLICER

**I. D. Naidenov, V. E. Panchuk, M. V. Yushkin**

The optical layout and performance characteristics of a device for measuring the four Stokes parameters are reported, and the principle of its operation is described. The device is designed for use in the NES echelle spectrograph mounted in the Nasmyth-2 focus of the 6-meter telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences. Tests of the device operating on the telescope showed the gain in limiting flux to be a factor of 2.7 and 6 in the red (5000 – 7000 Å) and blue (3500 – 4700 Å) parts of the spectrum, respectively, compared to an analyzer based on Fresnel rhombi.