

Концепция стокс – поляриметрического панорамного устройства для дистанционного исследования объектов из космоса

А. М. Шутов¹, В.Б. Быстранов², А.К. Киселёв¹

¹Нижегородский государственный педагогический университет
603095 Н. Новгород, ул. Ульянова, 1
E-mail: shutovam@nnspsu.ru

²Институт прикладной физики РАН
603950 Н. Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46
E-mail: tau@hidro.appl.sci-nnov.ru

Рассмотрена возможность построения панорамных поляриметрических устройств, предназначенных для измерения полной поляризации оптического излучения при дистанционном исследовании объектов из космоса, а также требования, предъявляемые к их предварительной калибровке. Указаны проблемы, которые необходимо решить при их создании, и направления исследований с помощью таких устройств, позволяющих измерять распределения всех параметров вектора Стокса.

При проведении различных поляриметрических исследований протяженных объектов, оптическое излучение от которых обладает пространственно – временной нестабильностью, наиболее удобными величинами, полностью характеризующими исследуемую поляризацию, являются параметры Стокса, введённые в 1852 году [1].

Из определений параметров следует [2, 3], что первый параметр Стокса представляет собой полную интенсивность волны; второй – разность интенсивностей ортогонально линейно поляризованных компонент; третий – разность интенсивностей ортогонально линейно поляризованных компонент, измеренных в линейном базисе, положение которого отличается на угол $\pi/4$ от положения линейного базиса, определяющего два первых параметра; а четвёртый параметр представляет собой разность интенсивностей двух противоположно циркулярно поляризованных компонент волны, т.е.:

$$\begin{aligned} S_1 &= I_x + I_y \\ S_2 &= I_x - I_y \\ S_3 &= I_{x'} - I_{y'} \\ S_4 &= I_r - I_l \end{aligned} \quad (1)$$

Таким образом, параметры Стокса имеют размерность интенсивности излучения и могут быть измерены непосредственно фотометрическим способом. Из (1) следует, что для вычисления всех параметров необходимо, по крайней мере, выполнить четыре измерения интенсивностей излучения, прошедшего через линейный поляризационный фильтр при позиционных углах 0° , 45° , 90° , 135° ; и два измерения с поляризационным фильтром, позиционированным под углом 0° , перед которым установлена фазовая ахроматизированная пластинка $\lambda/4$, главная ось которой составляет угол в $+45^\circ$ и -45° с главным пропусканием поляризационного фильтра.

Алгоритм определения параметров Стокса по формулам (1), имеет наименьшее число измерений и содержит только «быстрые» машинные операции сложения – вычитания, что потенциально делает рассмотренную методику измерения наиболее быстрой и экономичной в используемых ресурсах. Однако, окончательная машинная реализация алгоритма должна учитывать не идеальность реальных анализаторов поляризации и требует обязательного включения в состав измерительных приборов устройств калибровки.

Схема стокс – поляриметрического панорамного устройства для дистанционного исследования объектов из космоса может быть реализована с помощью устройства, схема которого представлена ниже (рис 1).

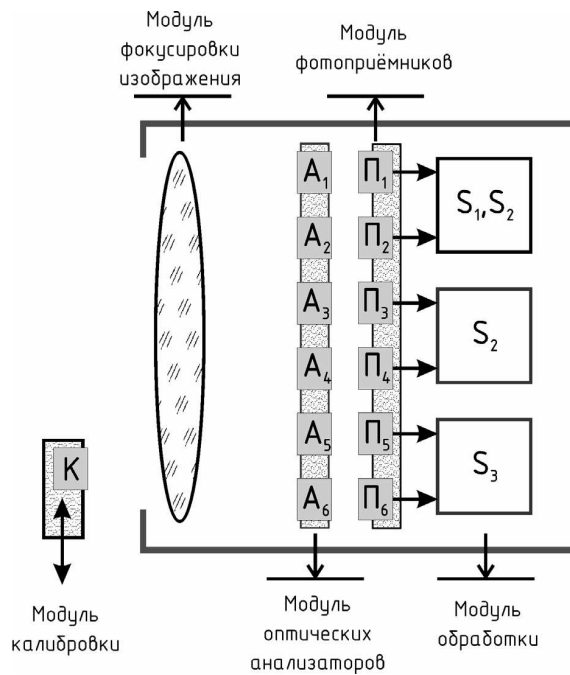


Рис. 1. Стокс – поляриметрическое панорамное устройство для дистанционного исследования объектов из космоса (метод одной экспозиции)

Использование современных быстродействующих электрооптических вращателей плоскости поляризации [4, 5, 6] позволяет реализовать схему последовательного ввода шести изображений. При этом, наиболее целесообразно использовать фотоприёмники в параллельном режиме измерений в количестве двух или трёх (например, в режиме RGB). При такой последовательности в измерениях необходим накопительный модуль в схеме обработки измерений (рис.2), что приводит к увеличению времени общего измерения параметров пропорционально количеству этапов. Возможен при этом вариант исполнения анализаторов поляризации в виде компактных сборок и установленных в линейке и позиционированных с помощью датчика положения. Такое конструктивное решение позволит использовать фотоприёмники обычной фотометрической системы и вводить линейку анализаторов непосредственно перед проведением поляриметрических измерений.

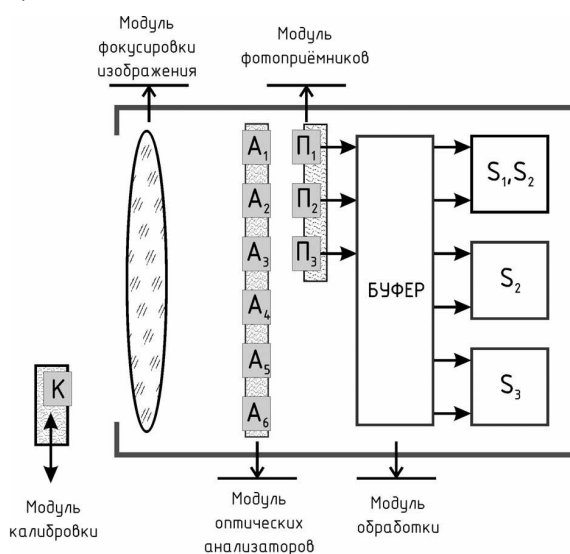


Рис. 2. Стокс – поляриметрическое панорамное устройство для дистанционного исследования объектов из космоса (метод двух экспозиций)

Измерение характера распределения поляризации протяженного объекта с помощью параметров Стокса удобно также тем, что при желании пользователя, через параметры Стокса могут вычислены любые параметры, характеризующие исследуемое оптическое излучение.

Кроме того, в процессе дальнейшей обработки, с целью повышения информативности полученных результатов, при визуализации распределений четырёх параметров Стокса было применено псевдо колориметрическое представление в формате RGB [7].

При этом, распределение полученных параметров в пределах панорамных изображений в каждом отдельном случае может быть определено тоном соответствующего цвета, а значение его насыщенностью.

Колориметрическое представление определяется линейным уравнением:

$$D = r R + g G + b B \quad (2)$$

Здесь коэффициенты r , g и b представляют собой постоянные величины.

Параметры Стокса, в случае частичной поляризации излучения, связаны между собой соотношением:

$$S_1^2 \geq S_2^2 + S_3^2 + S_4^2 \quad (3)$$

Поляризационные изображения сформированы так, чтобы общее цветовое изображение соответствовало параметру Стокса S_1 , красное изображение R – параметру S_2 , зелёное G – параметру S_3 и синее B – параметру S_4 . Значение каждого параметра, в соответствии с законами колориметрии определялось при каждом измерении насыщенностью цвета с помощью соответствующей цветовой панели градаций яркости.

Разработанный метод был опробован при получении поляриметрических изображений Луны на АО НГПУ 16.03.2005 г. в 23^h 07^m (UT) при $\Phi = 0.46$, на рефракторе АВР – 3. При этом, поляризационное изображение Луны, характеризующее распределение четвёртого параметра Стокса не производилось в виду его малости, менее 1% [8]. Алгоритм обработки полученных изображений с измеряемыми значениями интенсивностей света был реализован в вычислительном пакете программ MATLAB [9].

При цифровом фотографировании изображение Луны на фотоприёмнике ПЗС смещается из – за погрешности неудовлетворительного гидирования телескопа. С целью исключения смещения поляриметрических изображений было необходимо позиционировать поляризатор с помощью горизонтального датчика положения, а для совмещения изображений при их сложении и вычитании использован специальный программный пакет совмещения изображений ([http:// amlab.hs.ru](http://amlab.hs.ru)). Таким образом, были получены поляриметрические изображения Луны, которые характеризуют распределения трёх параметров Стокса, рис. 3, 4, 5.

При проведении исследований Луны считалось, что систематические ошибки измерений в основном определялись инструментальной поляризацией и были обусловлены:

1. паразитными поляризационными эффектами на оптических элементах системы;
2. неточностью установки угла поляриоида;
3. шириной спектрального интервала оптического излучения.

При поляриметрических исследованиях Луны считалось также, что при проведении панорамных исследований параметров Стокса с использованием дискретизации отсчёта значений параметров, ошибка измерений определялась шагом дискретизации. При этом относительная погрешность измерения параметров Стокса, составила 0.1.



Рис. 3. Поляриметрическое изображение Луны с панелью градаций яркости, характеризующее распределение первого параметра Стокса

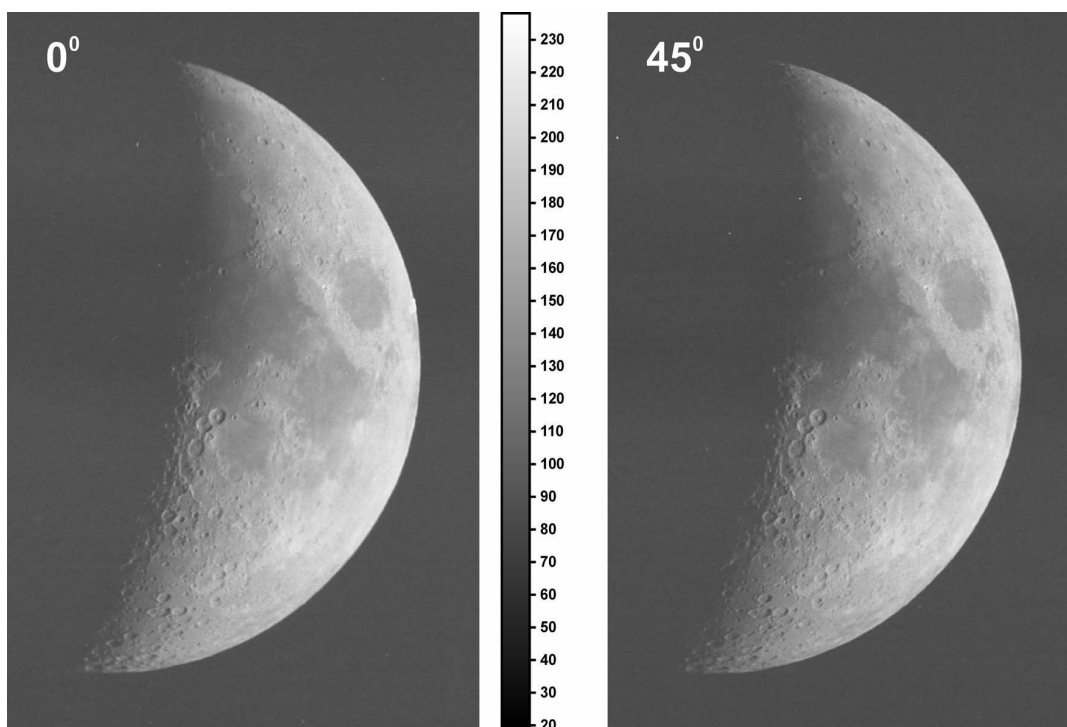


Рис. 4. Поляриметрические изображения Луны, характеризующие распределение излучения с ориентацией вектора \vec{E} параллельно и под углом $\pi/4$ к горизонтальному направлению

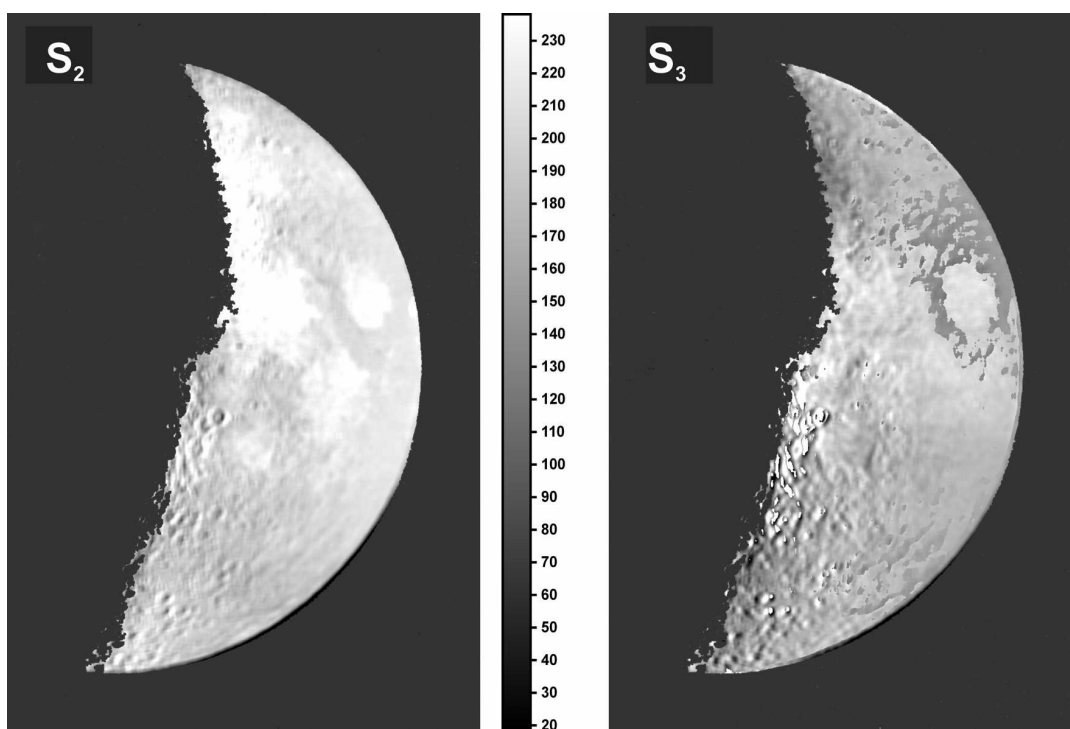


Рис. 5. Поляриметрические изображения Луны с панелями градаций поляризации, характеризующее распределение второго и третьего параметров Стокса

При конструировании стокс – поляриметрического панорамного устройства для дистанционного исследования объектов из космоса необходимо решить целый ряд специфических проблем, возникающих при эксплуатации устройства в условиях космического вакуума, значительного перепада температур, влияния движения КА и других причин, оказывающих влияние на результаты измерений.

Действие всех этих факторов невозможно исключить полностью, но можно учесть, ввиду их аддитивности, в дальнейшем, при настройке и проверке поляриметра, например, с помощью специального сконструированного стокс – калибратора [10].

Стокс – калибратор может быть изготовлен также в виде приставки к поляриметрическому устройству и состыкован с ним с помощью световода. Калибровка может быть выполнена с помощью внешних искусственных или естественных источников космического базирования. Для контроля инструментальной поляризации возможно наблюдать звезды – поляриметрические стандарты, например, 55 Cyg ($P = 2.745\%$) или I Reg ($P = 0.00\%$). Типичное значение инструментальной поляризации при этом может составить по предварительной оценке не более $0.10 - 0.15\%$.

В дальнейшем при поляризационной селекции, псевдо цветном отображении и визуализации информации в случаи идентификации различных неопознанных объектов при дистанционном исследовании объектов из космоса необходимо организовать лабораторные исследования различных материалов и природных объектов и использовать современные методы калибровки.

Объектами для поляриметрических исследований из космоса прежде всего являются Земля и Марс. Земля до сих пор является мало исследованным поляриметрическим объектом. Такое положение, очевидно, не может оставаться длительное время, и она может стать уникальным объектом исследований как для наземной поляриметрии, так и для поляриметрии с космических платформ. При этом можно выделить следующие направления:

- Околосемные исследования.
- Геологические исследования.
- Экологический мониторинг.

- Океанологические исследования.
- Метеорологические исследования
- Биологические исследования.
- Исследование полярных сияний.
- Исследования в области сельского хозяйства.
- Поляриметрические исследования различных регионов Земли из космоса.

Марс также является мало исследованным поляриметрическим объектом. В работах различных исследователей анализируются физические характеристики поверхности, атмосферы и частиц аэрозоля Марса по наземным поляриметрическим измерениям. Показано, что поляризация света зависит от долготы, причем амплитуда этой зависимости уменьшается к коротковолновому участку спектра.

Механизм поляризации света при диффузном отражении весьма разнообразен в зависимости от преломляющих и отражающих свойств поверхности. Он связан со степенью раздробленности вещества, и его способностью поглощать свет. Для малых по размерам частиц, сравнимых с длиной волны падавшего света, поляризация сильно зависит от λ . Поляризация, при рассеянии на частицах аэрозоля, зависит от состава, от размера, формы и показателя преломления материала, из которого состоят частицы. По оценкам некоторых авторов работ средний размер частиц аэрозоля в атмосфере Марса составляет 0,5 мкм, что близко к результатам измерений с КА “Викинг”. Влияние атмосферы на поляризацию света усиливается при приближении к краю диска планеты.

Литература

1. *Stokes G.G. Mathematical and Physical Papers. Vol.3 .France. Cambridge.Soc.9. 1852. 399 p.*
2. *Москалев В.А. Теоретические основы оптико-физических исследований. Л.: Машиностроение, 1987.*
3. *Шутов А.М. Методы оптической астрополяриметрии. Н. Новгород. 305 с.*
4. *Кучеров В.А., Шутов А.М. Высокоскоростной вращатель плоскости поляризации // А.С. № 1695180, Б.И. N 44, 30.11.1991.*
5. *Кучеров В.А., Шутов А.М. Фазосдвигатели с управляемыми параметрами // ОЖ, 1999. № 5. С. 79–84.*
6. *Кучеров В.А., Шутов А.М. Фазосдвигатель с управляемыми параметрами // Патент на изобретение № 2096761, зарегистрирован в ГРИ 20.11.1997.*
7. *Домбруков Р.М. Телевидение // Киев. 1979. С. 21–31.*
8. *Липский Ю.Н., Поспергелис М.М. Некоторые результаты измерений полного вектора Стокса для деталей поверхности Луны // А.Ж. 1967. Т. 44. № 2. С. 410–412.*
9. *Дьяконов В.П., Абраменкова И.В., Круглов В.В. MATLAB 5.3.1 с пакетами расширений // М: Нолидж, 2001. 880 с.*
10. *Шутов А.М., Быстранов В.Б. Стокс – калибратор // А.С. № 1083739, Б.И. № 13 от 10.05.96.*