

УДК 681.785

Многоугловой видеополяриметр оптического диапазона среднего пространственного разрешения

В. А. Селиванов¹, Ю. М. Гектин², С. А. Рябков³

¹к. т. н., доцент, ²к. т. н., ³аспирант

^{1,3}Московский технический университет связи и информатики,

²АО «Российские космические системы»

e-mail: selivanovctc@gmail.com

Аннотация. Основным ограничением для широкого внедрения пассивных видеополяризационных методов дистанционного зондирования подстилающих поверхностей является их повышенная чувствительность к угловым условиям наблюдения. В то же время именно угловая зависимость параметров вектора Стокса или их функционалов — степени и азимута поляризации, именуемая поляризационно-фазовой кривой (ПФК), служит «поляризационной сигнатурой» объекта исследования, поскольку содержит исчерпывающую информацию об оптических свойствах объекта и связана не только с физико-минералогическим составом, но и с микроструктурой поверхности. Однако размерность ПФК не позволяет осуществить ее отображение в виде двумерных изображений, что затрудняет выполнение совместной дешифрации традиционных спектрально-анализных и поляризационных изображений. Возможность сокращения размерности поляриметрической информации обусловлена относительной гладкостью ПФК, имеющей ограниченное число экстремумов. Поэтому восстановление формы ПФК может быть обеспечено по нескольким угловым отсчетам. В то же время для категоризации объектов по их оптическим свойствам оказывается вполне достаточно использовать не собственно ПФК, а лишь ряд их характерных признаков, таких как, например, абсолютные значения «положительного» и «отрицательного» максимума степени поляризации, угол инверсии азимута поляризации и т. д., которые также инвариантны к угловым условиям наблюдения. Эти поляризационные признаки могут служить такими же поляризационными сигнатурами объектов, но, в отличие от ПФК, могут отображаться в виде монохромных или синтезированных изображений.

Ключевые слова: многоугловая видеополяриметрия, параметры вектора Стокса, поляризационно-фазовые кривые, дистанционное зондирование Земли, Луны, Марса

Multiangle Video Polarimeter for Optical Range of Medium Spatial Resolution

V. A. Selivanov¹, Yu. M. Gekhtin², S. A. Ryabkov³

¹candidate of engineering science, associate professor,

²candidate of engineering science, ³postgraduate student

^{1,3}Moscow Technical University of Communication and Informatics,

²Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: selivanovctc@gmail.com

Abstract. The main limitation for the widespread introduction of passive video polarization methods for remote sensing of underlying surfaces is their increased sensitivity to the angular conditions of observation. At the same time, it is the angular dependence of the parameters of the Stokes vector or their functionals, the degree and the azimuth of polarization, which is called the polarization-phase curve (PFC), that serves as the "polarization signature" of the research object, since it contains exhaustive information about the optical properties of the object and is associated not only with its physical and mineralogical composition, but also with the microstructure of the surface. However, the dimension of the PFC does not allow displaying it as two-dimensional images, which makes it difficult to perform a joint decoding of the traditional spectrozonal and polarization images. The possibility of reducing the dimension of the polarimetric information is due to the relative smoothness of the PFC, which has a limited number of extrema. Therefore, the restoration of the shape of the PFC can be ensured by several angular readings. At the same time, to categorize objects according to their optical properties, it is quite sufficient to use not the actual PFC, but only a number of their characteristic features, such as, for example, the absolute values of the "positive" and "negative" maximum of the degree of polarization, the polarization azimuth inversion angle, etc., which are also invariant to the angular conditions of observation.

Keywords: multiangle video polarimetry, Stokes vector parameters, polarization-phase curves, remote sensing of the Earth, the Moon and Mars

1. Концепция

Отраженный от подстилающей поверхности оптический сигнал в узком спектральном диапазоне полностью описывается четырьмя параметрами вектора Стокса, где первый параметр — это интенсивность, измеряемая непосредственно, а три остальных параметра, характеризующие поляризацию, измеряемы косвенно, путем установки различно ориентированных поляризаторов перед фоторегистрирующими устройствами в нескольких синхронных оптических каналах и линейной межканальной обработке соответствующих сигналов. Включение помимо интенсивности в рассмотрение оставшихся трех параметров вектора Стокса открывает возможность регуляризации обратного решения уравнения переноса (УПИ) в отношении определения оптических свойств поверхности и размеров рассеивающих частиц и в конечном счете обеспечивает возможность оценки физико-минералогического состава объектов при дистанционном измерении. Стокс-фотополяриметрия обеспечила значительный прогресс в понимании физико-минералогического состава объектов Солнечной системы как при наблюдении их с Земли, так и при реализации различных исследовательских миссий [1]. Технология телевизионной стокс-поляриметрии (видеополяриметрии), обеспечивающая измерение и отображение двумерного распределения параметров вектора Стокса при решении задач ДЗЗ как для наземных подспутниковых, так и аэрокосмических экспериментов, начала активно разрабатываться в конце прошлого столетия [2–4], но интерес к этой тематике достаточно быстро угас.

Отсутствие значительного интереса до последнего десятилетия исследователей в области ДЗЗ к планомерным поляриметрическим видеоизмерениям подстилающей поверхности связаны со сложностью интерпретации экспериментальных результатов, что, в свою очередь, обусловлено двумя основными причинами. Во-первых, это малая поляризующая способность большинства природных образований, исключая, правда, снежные и песчаные поверхности, и искажающее влияние рассеяния в атмосфере, приводящего, с одной стороны, к деполаризации отраженного от подстилающей поверхности оптического сигнала и появлению значительной

аддитивной поляризованной помехи с другой. Совокупность этих двух феноменов обеспечивает работу видеоизмерительных устройств в так называемом режиме ограничения помехой обратного рассеяния (ПОР). Обеспечение необходимой поляризационной контрастной чувствительности приборов сводится к известной в практике ДЗЗ технической задаче увеличения динамического диапазона телевизионных систем и редукции сквозь атмосферу на основе модельных представлений и трассовых корректирующих измерений.

Вторая причина носит методологический характер и обусловлена доминирующим диэлектрическим типом взаимодействия излучения с веществом большинства естественных образований, при котором поляризационные характеристики отраженного излучения в большей степени определяются текущими угловыми условиями наблюдения, нежели оптическими характеристиками отражающей/рассеивающей поверхности. Форма зависимости поляризационных компонент излучения от фазового угла (угол между направлениями визирования и падения излучения на объект) называется поляризационно-фазовой кривой (ПФК) параметров вектора Стокса. Эта форма претерпевает незначительные вариации в зависимости от физико-химического и дисперсионного состава естественных образований, которые не могут быть выявлены при фиксированном угле измерения. Фактически лишь непрерывные ПФК параметров вектора Стокса, как это было продемонстрировано впервые при исследованиях лунного реголита, могут служить относительно стабильными «поляризационными сигнатурами» объектов в той же степени, как спектральные коэффициенты яркости (СКЯ) для случая измерения интенсивности при спектрально-зональных измерениях. По этим причинам достоверная оценка поляризационных сигнатур наземных объектов в естественных условиях практически неосуществима при традиционном моноугловом методе наблюдения, а непрерывное угловое сканирование приводит к колоссальной избыточности измерительной информации и невозможности визуальной интерпретации результатов. Плавность хода кривых ПФК природных образований позволяет осуществить процедуру их точного восстановления по ограниченному числу угловых отсчетов [5].

Полученное точное решение УПИ [6] обеспечивает возможность восстановления комплексного коэффициента преломления отражающей/рассеивающей поверхностей и размеров рассеивающих частиц на основании ПФК или ограниченного числа некоррелированных скалярных параметров ПФК (например, максимальной степени линейной/круговой поляризации, максимальной степени «отрицательной ветви» ПФК линейной поляризации, угла инверсии линейной поляризации — скачка азимута поляризации, фазового угла, соответствующего максимальной степени линейной/круговой поляризации).

Возможность нормировки этих положительных параметров позволяет использовать их в качестве самостоятельных компонентов нового «поляризационного метрического пространства», приспособленного для отображения в виде синтетического изображения.

2. Современный уровень зарубежных исследований

Наибольшие практические достижения в области поляризационных измерений из космоса получены в области оценки газового и аэрозольного составов атмосферы. В то же время прототипы космических приборов многоуглового метода измерений, отвечающие концепции Multi-viewing, Multi-channel, Multi-polarisation Imager (3MI), например таких, как спутники второго поколения EUMETSAT, Polar System (EPS-SG), POLDER, PARASOL или Hyper-Angular Rainbow Polarimeter, установленные на аэроносителях, демонстрируют эффективность многоуглового подхода для регуляризации обратного решения при зондировании подстилающих поверхностей [5]. Однако их конструктивные решения и алгоритмы обработки результатов измерений не предусматривают ни восстановления ПФК, ни выявление угловых поляризационных инвариантов, наиболее приспособленных для формирования двумерных изображений.

3. Алгоритм работы прибора

1. Синхронное формирование изображений поверхности путем электронного однострочного

сканирования в одном надирном и 3 развернутых по направлению полета оптических каналах с углами визирования 15,0, 30,0 и 45,0 град с последовательной сменой от 4 до 6 поляризационных фильтров в каждом оптическом канале за время формирования интегральной строки изображения.

2. Геометрическая коррекция угловых поляризметрических изображений.

3. Вычисление параметров вектора Стокса и их функционалов в соответствии с классической схемой поляриметрии для каждого угла наблюдения.

4. Пространственное (временное) совмещение поляриметрических изображений, полученных под различными углами.

5. Восстановление различных ПФК путем интерполяции угловых отсчетов параметров вектора Стокса и их функционалов для каждого пикселя изображения надирного канала.

6. Выделение угловых инвариантов восстановленных ПФК поляризационных признаков и отображение их в виде монохромных изображений.

4. Ожидаемые новые научно-практические результаты

Мониторинг состояния подстилающей поверхности:

1) для акваторий — выявление нефтяных пленок и оценка мощности загрязнения (на основании оценки пространственного распределения толщины пленки);

2) для растительного покрова — ранняя диагностика степени деградации состояния листовой пластинки;

3) для мелкодисперсных открытых грунтов — динамическая оценка увлажненности, оценка динамики движения сыпучих компонент в регионах полупустынь/пустынь, точное районирование различных видов песчаной поверхности;

4) для снежных поверхностей — классификация состояния снежного покрова, связанного с размерами и связностью кристаллов, раннее выявление и мониторинг динамики осадения атмосферных загрязнений;

5) для облачного покрова — точная оценка аэрозольного состава (распределение частиц по размерам);

6) для задач перспективных исследований — создание классификатора «поляризационных сигнатур» природных и искусственных образований.

5. Технические характеристики прибора

Спектральный диапазон, мкм: 0,5–0,65.

Количество оптических каналов: 4.

Углы зондирования оптических каналов относительно надира, град: 0,0, 15,0, 30,0, 45,0

Количество независимых поляризационных измерений в каждом оптическом канале, min–max: 4–6.

Метод формирования поляризационных измерений в каждом оптическом канале: последовательный.

Метод формирования изображений в оптических каналах: синхронный, однострочный.

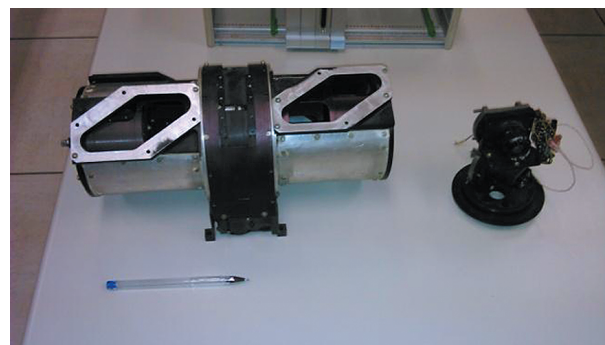


Рис. 2. Внешний вид оптико-механического 4-угольного видеополяриметра

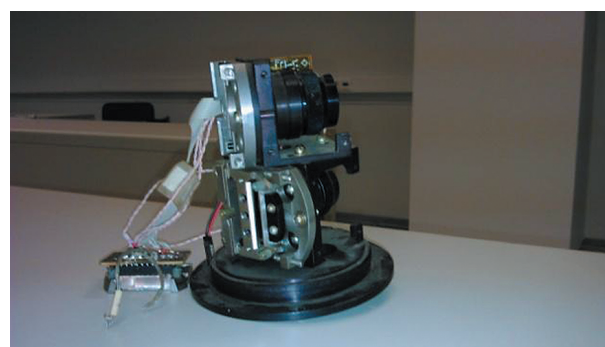


Рис. 3. Оптический блок с двумя оптическими ветвями

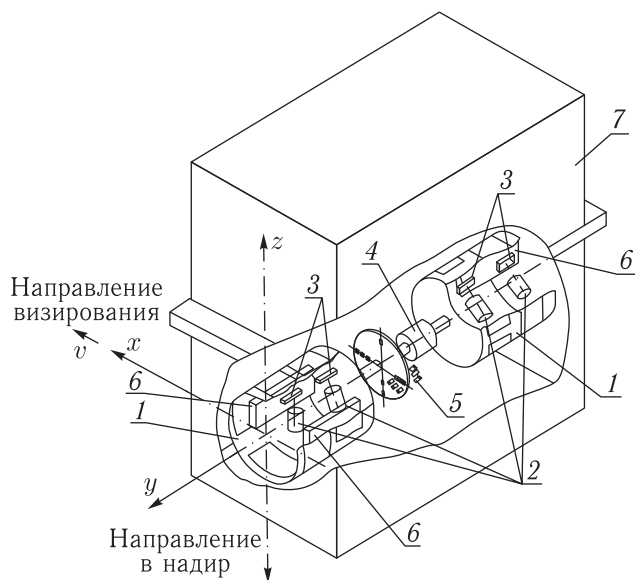


Рис. 1. Вариант построения многоугольного видеополяриметра: 1 — барабаны сменных поляризационных фильтров; 2 — объективы угловых каналов; 3 — линейные фотоприемники; 4 — двигатель; 5 — устройство синхронизации; 6 — блок управления фотоприемниками; 7 — корпус

Разрешение на поверхности в надире, м: 200.

Полоса обзора, км: 400.

Высота полета космического аппарата, км: 650.

Предполагается наличие встраиваемого метрологического обеспечения, в том числе надирного несканирующего датчика оценки толщины атмосферы в диапазоне 0,32–0,38 мкм.

Масса прибора, ориентировочно, кг: 20.

Энергопотребление, Вт: 50.

На рис. 1 представлен чертеж варианта построения многоугольного видеополяриметра, а на рис. 2 и 3 — фотографии его лабораторного макета.

Список литературы

1. *Mishchenko M.I., Rosenbush V.K., Kiselev N.N., Lupishko D.F., Tishkovets V.P., Kaydash V.G., Belskaya N., Efimov Y.S., Shakhovskoy N.M.* Polarimetric remote sensing of solar system objects. K.: Akademperiodyka, 2010. 291 p.

2. Селиванов В.А., Джаппаркулов Б.К., Цветков А.И. и др. Техника телевизионной поляриметрии // Техника кино и телевидения, 1992, № 3. С. 38–43.
3. Egan W.G., Johnson W.E., Whitehead V.S. Terrestrial Polarisation Imagery Obtained from the Space Shuttle: Characterization and Interpretation // Appl. Opt., 1991, vol. 30, № 4. P. 435–442.
4. Беляев Б.И., Катковский Л.В. Оптическое дистанционное зондирование. Минск: БГУ, 2006. 455 с.
5. Селиванов В.А., Гектин Ю.М., Будаков В.П. Задачи поляризационного дистанционного зондирования в оптическом диапазоне // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2016, т. 3, вып. 3. С. 35–45.
6. Budak V.P., Klyuykov D.A., Korkin S.V. Complete matrix solution of radiative transfer equation for PILE of horizontally homogeneous slabs // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2011, vol. 112. P. 1141–1148.