

УДК 681.785

Задачи поляризационного дистанционного зондирования в оптическом диапазоне

В. А. Селиванов¹, Ю. М. Гектин², В. П. Будак³

¹к.т.н., доцент, Московский технический университет связи и информатики

²к.т.н., АО «Российские космические системы»

³д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «МЭИ»

e-mail: selivanovctc@gmail.com

Аннотация. Проводится анализ работы широкого класса многоугловых видеополяризметрических систем, рассматриваются задачи повышения надежности поляризационных измерений атмосферы и подстилающей поверхности и уменьшения размерности отображаемой информации.

Ключевые слова: многоугольная видеополяриметрия, параметры Стокса, поляризационно-фазовые кривые, дистанционное зондирование

The Tasks of Polarization Remote Sensing in Optical Band

V. A. Selivanov¹, Yu. M. Gekhtin², V. P. Budak³

¹candidate of engineering science, associate professor,

Moscow technical university of communication and information science

²candidate of engineering science, Joint Stock Company "Russian Space Systems"

³doctor of engineering science, professor, National research university "Moscow energetic institute"

e-mail: selivanovctc@gmail.com

Abstract. The operation analysis of a broad class of multi-angle video polarimeter systems is carried out. The problems of improving the polarization measurement reliability of the atmosphere and the underlying surface are considered. The possibilities of reducing the dimension of the display information are analyzed.

Keywords: multi-angle video polarimeter, Stokes parameters, polarization-phase curves, remote sensing

Введение

Минуло более 50 лет, как в своей статье [1] Г. В. Розенберг констатировал, что измерение поляризации излучения позволяет получить всю доступную оптическим методам измерения информацию. За это время было реализовано несколько фундаментальных исследовательских программ по пассивному измерению поляризации отраженного излучения объектами ближнего и дальнего космоса, Земли со спутников и самолетов, разработаны лидеры и выполнены многочисленные измерения матриц рассеяния различными объектами. Было продемонстрировано, что измерение поляризующей способности природных образований, осуществляемое в дополнение к измерениям отражательной способности, приближает возможности корректного решения обратной задачи средствами пассивного дистанционного зондирования (ДЗ): определения физико-химического, минералогического состава подстилающей поверхности и атмосферы, определения их микроструктуры.

При решении прямых задач ДЗ стало возможным уверенно определять возраст и загрязненность снежного покрова, состав и увлажненность почв, физиологическое состояние растительности, размер и мощность загрязнений акваторий. Спектр успешно решаемых задач, методологии и варианты приборной реализации видеополариметрических измерительных систем рассматриваются в ряде обзорных работ [2–7], анализ которых показывает, что эффективность метода поляризационного зондирования наиболее ярко продемонстрирована при решении задач, связанных с оценкой аэрозоля. Минимизация систематических и динамических ошибок в оптико-электронных трактах видеополариметров обеспечило возможность реализовать процедуры измерения поляризованного света с погрешностью менее 1 %, что обеспечило надежную оценку не только концентрации и размеров частиц, но и их формы. Такие оценки позволяют судить о происхождении аэрозоля и его влиянии на атмосферные явления. Уникальная чувствительность поляризационных измерений к малым вариациям аэрозольных параметров послужила основой создания спутниковых и самолетных видеополариметрических систем, которые обеспечивают непрерывный глобальный мониторинг загрязнений атмосферы.

При поляризационном ДЗ подстилающих поверхностей, несмотря на выявленный широкий круг потенциальных приложений, столь значимых результатов от применения видеополариметрических систем пока не удается продемонстрировать. Цель настоящей работы — выявление естественно-физических и технологических причин сложившейся ситуации и определение направлений совершенствования технологии видеополариметрии.

Принцип стокс-видеополариметрии

Возможности решения прямых и обратных задач ДЗ на основании данных видеополариметрических измерений являются прямым следствием стоксовского формализма, в соответствии с которым полное описание квазимонохроматического, с длиной волны λ , частично поляризованного светового пучка обеспечивается четырьмя параметрами вектора Стокса [8]

$$\mathbf{S}(\lambda) = [I, Q, U, V]^T, \quad (1)$$

имеющими размерность интенсивности — первого параметра I . Параметры Q и U характеризуют состояние линейной поляризации, V — эллиптической поляризации пучка. Параметры Q и U индицируют преимущественное направление колебаний электрического вектора в плоскости, например, перпендикулярной плоскости «источник излучения–объект–наблюдатель», и в плоскости, развернутой на 45° относительно этой выбранной плоскости референции. Стокс-параметры измеряются косвенно, через измерения интенсивности в оптических каналах после ее модуляции линейными анализаторами и устройствами сдвига фазы. Пространственное распределение стокс-параметров носит название стокс-изображений $L_S(x, y)$. Формально эти параметры предполагают определенную процедуру их измерения с помощью дискретной поляризационной модуляции светового потока, т. е. требуется проведение шести измерений интенсивности при фиксированных положениях линейных анализаторов и двух круговых анализаторов, а именно:

$$\begin{aligned} I &= I_0 + I_{90}, & Q &= I_0 - I_{90}, \\ U &= I_{45} - I_{135}, & V &= I_L - I_R, \end{aligned} \quad (2)$$

где индексы 0, 90, 45, 135 обозначают углы плоскости пропускания линейных поляризаторов, L и R — лево- и правоциркулярный поляризаторы.

Амплитудно-угловая зависимость пропускания линейных поляризаторов нелинейна и имеет косинусквадратичный характер. Для минимизации погрешностей измерения может применяться иная схема расположения поляризаторов, а число измерений должно быть увеличено [9]. В пределе линеаризация угловой чувствительности может быть достигнута при бесконечном числе угловых измерений, что означает переход к непрерывной модуляции. Однако реализация такой схемы измерения для относительно подвижных объектов представляет собой сложную техническую задачу.

Три параметра вектора Стокса, связанные с поляризацией, линейно зависят от освещенности исследуемого объекта. В практике поляриметрии для оценки поляризующей способности объектов используются функционалы параметра вектора Стокса, не имеющие такой зависимости: степень поляризации P , определяющая долю поляризованного излучения, измеряемую в относительных единицах; азимут поляризации θ , определяющий поворот плоскости поляризации относительно плоскости референции, измеряемый в градусах; угол эллиптичности ε , характеризующий раскрыт эллипса, измеряемый в градусах.

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I}, \quad \theta = \frac{1}{2} \arg \tan \left(\frac{U}{Q} \right),$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \arg \sin \left(\frac{V}{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}} \right). \quad (3)$$

Эти функционалы в пространстве параметров вектора Стокса однозначно определяют частично поляризованный пучок на единичной сфере Пуанкаре [10]. Вследствие ограниченного диапазона измерений функционалы P , θ и ε оказываются наиболее приспособлены для отображения в виде двумерного распределения яркостей $L_{P,\theta,\varepsilon}(x, y)$.

Краткая история пассивной стокс-видеополяриметрии

Традиционно историю видеополяриметрии как инструмента ДЗ связывают с открытием Агаго, в 1811 г. наблюдавшего поляризации отражен-

ного Луной света в полярископ, однако планомерные поляриметрические наблюдения поверхности Луны начались лишь в 20-х гг. XX столетия [11]. Однако фотополяриметрия планет и подстилающей поверхности Земли из-за необходимости проведения вычислительных процедур не смогла получить широкого распространения до момента появления цифровых методов обработки изображений [12]. Уже первые изображения поляризационных функционалов P и θ естественных и антропогенных объектов продемонстрировали исследователям качественные отличия изображений от привычных изображений двумерного распределения интенсивности, что стимулировало разработку телевизионных видеополяриметрических устройств для лабораторных наземных [13, 14] и самолетных измерений [5] и проведение спектрополяриметрических исследований естественных поверхностей [16].

В результате проведенных исследований был определен перечисленный выше круг потенциальных задач ДЗ, которые могли бы быть успешно разрешены с помощью видеополяриметрических систем, и выявлен ряд феноменов, свойственных поляризационным наблюдениям. Во-первых, степень линейной поляризации отраженного от большинства естественных поверхностей солнечного излучения не превышает в среднем 15%, что предъявляет повышенные требования к дифференциальной чувствительности регистрирующих систем. Во-вторых, степень линейной поляризации имеет ярко выраженную зависимость от угла визирования и угла Солнца, даже в пределах поля зрения объектива, что затрудняет идентификацию оптически однородных объектов, разнесенных в пространстве. В-третьих, изображения $L_{\theta}(x, y)$ азимута поляризации чувствительны к шумам, но эффективно индексируют границы объектов. В-четвертых, эллиптичность отраженного излучения естественными образованиями пренебрежимо мала [17] (исключая случай отражения тонкими пленками нефтяных загрязнений акваторий). Этот факт позволил исследователям сосредоточиться на разрешении проблем измерения лишь линейной поляризации при разработке перспективных моделей видеополяриметров. Наконец, в-пятых, определились ограничения потенциально достижимой точности измерений, связанные с искажающим влиянием атмосферы.

Естественное солнечное излучение не является поляризованным, но, претерпевая рассеяние в толще атмосферы, оно становится частично линейно поляризованным, достигая поверхности. Поэтому отраженное от поверхности объектов излучение содержит как поляризованную компоненту, обусловленную собственной поляризующей способностью по отношению к падающему неполяризованному излучению, так и поляризованную компоненту, обусловленную собственной деполаризующей способностью по отношению к падающему поляризованному излучению. Отраженное от поверхности поляризованное излучение частично деполаризуется за счет рассеяния в атмосфере. Наконец поляризованное атмосферой излучение создает аддитивную помеху поляризованному излучению, отраженному от объекта, значительно превышающую полезный поляризованный сигнал.

Обозначенные проблемы охватывают две взаимно перекрывающиеся области: аппаратные проблемы обеспечения требуемой точности оценки поляризационных характеристик отраженного излучения и проблемы интерпретации результатов.

Аппаратные погрешности измерений связаны с возникновением специфических поляризационных искажений, свойственных двум основным схемам получения поляризационных отсчетов: последовательной либо параллельной. В последовательной схеме за время экспонирования стока-изображения перед единственным объективом должно осуществиться перемещение как минимум четырех поляризаторов, выполненных на основе широкоапертурных пленочных поляроидов. В параллельной схеме, при наличии одного объектива, необходимо использование светоделителей или увеличение числа независимых идентичных оптико-электронных измерительных каналов. Необходимо отметить, что проблемы минимизации аппаратных погрешностей и массогабаритных характеристик бортовых устройств в настоящее время могут быть кардинально снижены в связи с появлением малогабаритных активных анализирующих устройств на основе ферроэлектрических жидких кристаллов [18], устанавливаемых в фокальной плоскости, или микрополяризаторов — Metallic Nanowire Polarization Filter, формируемых непосредственно на светочувствительных элементах CMOS-фотоприемника [19].

При поляризационных наблюдениях естественных поверхностей основная проблема связана с интерпретацией измерений. Поляризационные параметры отраженного излучения от поверхностей естественных и искусственных образований оказались более чувствительны к углам освещения и наблюдения, нежели к физико-химическому составу [20]. Подобная проблема, носящая менее принципиальный характер для интерпретации, имеет место при измерениях интенсивности излучения, отраженного от сложных поверхностей, имеющих анизотропные индикатрисы отражения. Поэтому для повышения надежности дешифрирования изображений интенсивности используется двунаправленная функция отражательной способности BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function), которую можно оценить лишь при многоугловом методе измерения. Однако в практике спутникового ДЗ спектральный коэффициент яркости (СКЯ), оцениваемый по ограниченному числу спектральных отсчетов — результатов измерений интенсивности в узких спектральных каналах, является надежной оптической сигнатурой широчайшего класса природных образований, инвариантной к угловым условиям наблюдения. Для пассивных поляриметрических измерений оптического диапазона в качестве сигнатуры, инвариантной к условиям наблюдения, используется угловая (также называемая фазовой) зависимость поляризационных параметров вектора Стокса и их функционалов. Фазовый угол α — это угол между направлением падения излучения и направлением визирования в плоскости, задаваемой этими направлениями. Эти зависимости носят названия поляризационно-фазовых кривых (ПФК), тесно связанных с понятием BPDF (Bidirectional Polarization Distribution Function) [21].

Принцип многоугловой стокс-видеополяриметрии

В простейшем случае регистрации зеркально отраженного излучения от границы «воздух-пространственно однородный диэлектрик», в соответствии с законом Френеля величина линейной поляризации отраженного излучения положительна, имеет одномодовую зависимость от угла

падения со 100%-м максимумом при угле Брюстера, однозначно связанного с коэффициентом преломления. Однако коэффициенты преломления большинства диэлектриков сосредоточены в узком диапазоне 1,3–1,6, что, казалось бы, не позволяет использовать критерий угла Брюстера для решения задач распознавания широкого класса естественных объектов. Однако в реальной ситуации структура поверхности имеет неоднородный состав и отраженное излучение формируется в приповерхностном объеме вещества порядка длины волны, в котором происходят переотражения, преломления и рассеяния светового излучения, что позволяет рассматривать этот отражающий/рассеивающий объем как мутную среду. На макроструктуре поверхности возникают затенения, что в совокупности обеспечивает сложный интегральный эффект, зависящий от степени пространственного осреднения. В простейшей модели поверхности, не учитывающей эффекты рассеяния, поверхность может быть представлена совокупностью хаотически ориентированных зеркально отражающих микроплощадок (фасеток) диэлектрика, расположенных на плоской подложке. Отраженное излучение при пространственном осреднении будет лишь частично линейно поляризовано, и возникнет зависимость степени поляризации от фазового угла. Такая модель используется при упрощенном анализе отраженного излучения от снежных или песчаных поверхностей. Если подобная неоднородная поверхность будет иметь преобладающее направление нормалей фасеток при наличии макронеровностей подложки, то угловое положение максимума степени поляризации может быть заметно смещено относительно угла Брюстера. Это смещение будет характеризовать уклон подложки поверхности. Возникающая возможность оценки уклона по анализу угловой зависимости степени поляризации лежит в основе алгоритма 3D-реконструкции поверхностей на основе стокс-изображений [22].

При рэлеевском рассеянии на частицах, сравнимых с длиной волны, что характерно для чистой атмосферы, угловая зависимость степени поляризации принимает только положительные значения. Если многократное рассеяние происходит на частицах, значительно больших длины волны (рассеяние Ми), и дополняется поглощением и пе-

реотражением, то в угловой зависимости степени поляризации могут возникать дополнительные максимумы, сопровождаемые инверсией плоскости поляризации. Впервые явление «отрицательной» линейной поляризации, смещенной в область малых фазовых углов, было обнаружено Бернаром Лио при поляриметрическом наблюдении поверхности Луны в 1922 г. [23] и смоделировано им в лабораторных условиях на мелкодисперсных порошках. Открытие «отрицательной» ветви линейной поляризации стимулировало развитие общей теории переноса излучения в мутных средах с учетом поляризации для разрешения обратной задачи определения состава и размеров рассеивающих частиц при исследовании космических объектов [11, 24–26]. Было установлено, что влияние объема вещества слоя сказывается на положительной ветви ПФК в виде подавления значений степени поляризации в максимуме и в смещении максимума влево от положений под углом Брюстера. С возрастанием анизотропии рассеяния возрастает степень поляризации для больших значений фазового угла вследствие уменьшения вклада объемного рассеяния слоем: преобладают отклонения лучей на малые углы от первоначального направления, что вызывает их большее поглощение в толще слоя. Многократные переотражения от сложной поверхности приводят к росту «отрицательной моды» ПФК. Важнейшим результатом проведенных исследований для практики ДЗ явилось доказательство высокой чувствительности формы угловой зависимости параметров вектора Стокса к появлению малых концентраций аэрозоля в атмосфере.

Для восстановления плавных одномодовых ПФК достаточно 4–6 угловых отсчетов, расположенных в диапазоне 0–180°. При наблюдении поверхности Земли возникают ограничения диапазона возможных углов зондирования. При сложной структуре мутной среды ПФК также приобретает сложный характер, что требует увеличения числа угловых отсчетов.

Для иллюстрации поведения ПФК степени линейной поляризации на рис. 1 и 2 приведены результаты моделирования для двух типов объектов: аэрозоль — «Aer» и облако — «Cloud». Модельные объекты представлены в виде плоского слоя мут-

ной среды с взвешенными частицами сферической формы, распределенными по радиусу по закону

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi sr}} \exp\left(-\frac{\ln^2(r/r_0)}{2s^2}\right). \quad (4)$$

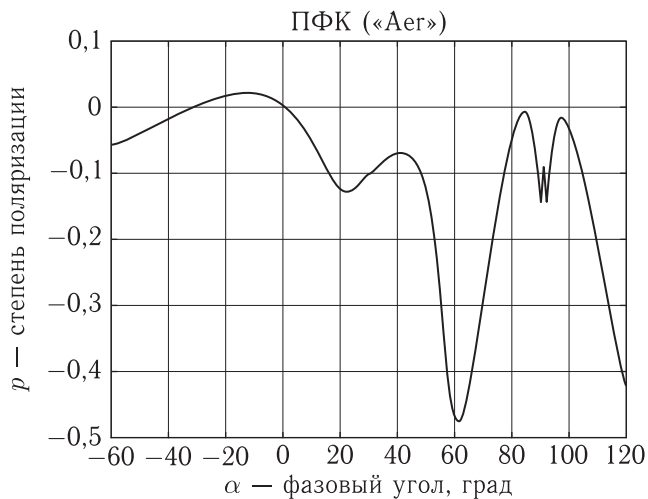


Рис. 1. Поляризационно-фазовая кривая для объекта типа «аэрозоль»

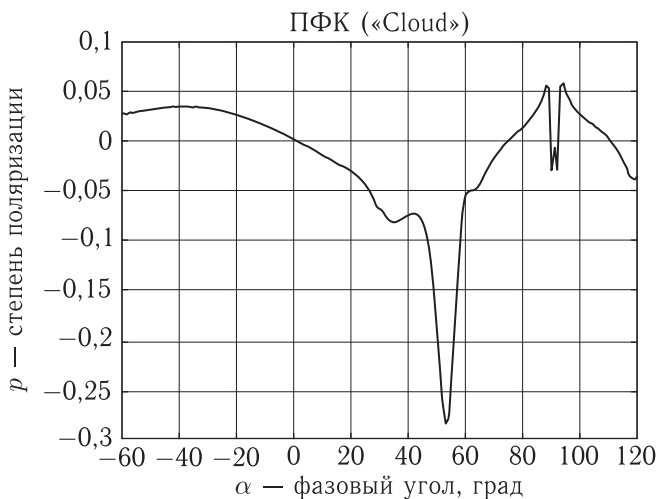


Рис. 2. Поляризационно-фазовая кривая для объекта типа «облако»

Расчеты оптических параметров среды (показателей поглощения и рассеяния, индикатрисы рассеяния) проводились по теории Ми:

- объект «Аер», $r_0 = 0,3$ мкм, $s = 0,92$, $\lambda = 412$ нм, показатель преломления частиц $m = 1,385$;

- объект «Cloud», $r_0 = 5,0$ мкм, $s = 0,4$, $\lambda = 412$ нм, показатель преломления частиц $m = 1,385$,

интегрирование по радиусам ограничивалось $r \leq 100$ мкм. Излучение Солнца направлено на слой под углом 60° с нормалью к границе слоя. Фазовый угол, равный нулю, соответствует углу визирования из-под Солнца.

Отраженное излучение моделировалось на основе решения векторного уравнения переноса для плоского слоя [27–30]. Данная модель плоского слоя также применима для подстилающей поверхности, если учитывать поглощение в подложке на нижней границе слоя.

Современное состояние многоугольного видеополаризационного ДЗ

Стремление исследователей максимизировать измерительную информацию об оптических характеристиках подстилающей поверхности, получаемую одним прибором, привело к формированию концепции ЗМИ (Multi spectral, Multi angle, Multi polarization Image). Современные и перспективные спутниковые и самолетные многоугольные видеополариметры в той или иной степени соответствуют этой концепции.

Первым полариметром, открывшим эру многоугольного полариметрического спутникового наблюдения Земли, стал французский спутниковый полариметр POLDER (POLarization and Directionality of the Earth's Reflectances) [31], запущенный в двух версиях POLDER-1 и POLDER-2 на японских спутниках-носителях ADEOS-1 и ADEOS-2 (Advanced Earth Observation Satellite — орбита спутника около 800 км) в 1996 и 2002 гг. (последний вышел из строя в 2003 г.). POLDER представляет собой широкопольный ($\pm 43^\circ \times \pm 51^\circ$) многоспектральный пассивный радиометр, предназначенный для измерения характеристик излучения, диффузно отраженного атмосферой и поверхностью Земли с учетом поляризации. Назначение системы — газовый и аэрозольный анализ состояния атмосферы и ее облачного покрова, спектральный анализ растительного покрова

и состояния почв, измерение параметров излучения при отражении от поверхности океанов. Поляризационные измерения проводятся в спектральных каналах в районе 443, 670 и 865 нм при ширине полосы 20 нм в каждом из каналов. Относительная точность измерений составляет 2–3 %.

В POLDER используются ПЗС-матрица и широкоугольный линзовый объектив, между которыми установлен вращающийся барабан, снабженный спектральными фильтрами и линейными анализаторами. Вторая спутниковая программа Франции и Японии, направленная на исследование поляризационных и анизотропных свойств отраженного атмосферой излучения при помощи лидара PARASOL (Polarization & Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Sciences coupled with Observations from a Lidar), была запущена в 2004 г. Она реализуется группировкой малых спутников (орбита около 700 км), получающих данные в узких спектральных диапазонах. Разнородные данные обрабатываются совместно на земных станциях [32]. Основным инструментом данной спутниковой программы является аналогичный пассивный поляриметр POLDER с увеличенной скоростью передачи данных. Однако работа данной системы совместно с космическим лидаром CALIPSO [33] позволяет использовать PARASOL и как активную поляриметрическую систему.

В 2011 г. в NASA планировался запуск спутника по программе GLORY [34] (масса 553 кг, орбита 705 км), оснащенного прибором ДЗ аэрозолей и облаков на основании данных поляризационных измерений — орбитальным сканирующим фотополариметром Aerosol Polarimetry Sensor (APS) [35]. Запуск оказался неудачным, однако предполагается, что миссия будет выполнена до 2020 г. Задачи миссии — дистанционный контроль антропогенного и естественного атмосферных аэрозолей, анализ их влияния на климат за счет измерения полной яркости и состояния линейной поляризации излучения в девяти спектральных каналах APS, расположенных в диапазоне от 0,41 мкм до 2,25 мкм. Сканирование призвано обеспечить многоугловой (более 200 направлений) метод измерения. Прототип APS — RSP (Research Scanning Polarimeter) активно используется при зондировании аэрозоля и поверхности Земли с борта самолета.

По программе NASA после 2020 г. на орбите должен начать работать малогабаритный гиперугловой поляриметр HARP — Hyper-Angular Rainbow Polarimeter, нацеленный на решение аналогичного круга задач, прототип которого отрабатывается при самолетных исследованиях [36]. В отличие от POLDER, поляризационное разделение в нем осуществляется за счет призм. Измерения проводятся в трех спектральных каналах: 550, 670, 870 нм, при этом обеспечиваются наблюдения для 60 углов с разрешением на поверхности 2,5 км.

Необходимо отметить, что революционной технологической вехой в развитии поляриметрических устройств для космических исследований станет выведение на орбиту James Webb Telescope, в оптической схеме интерферометра которого используется CMOS с микрополяризаторами, произведенными компанией MOXTEK [37].

Долговременное функционирование космических миссий и общедоступность постоянно пополняемых результатов измерений способствовали разработке разнообразных приборов самолетного базирования как для целей проведения подспутниковых исследований, что имеет самостоятельное значение из-за относительно высокого пространственного разрешения и значительно меньшего искажающего влияния атмосферы, так и в качестве прототипов перспективных спутниковых приборов. К таким многоугловым видеополариметрам относятся:

– упомянутый прототип для миссии GLORY [38];

– прототип российского спутникового многоуглового видеополариметра с 4 углами визирования в диапазоне от -60° до $+60^\circ$ относительно надир, использующий линейные фотоприемники, размещенные вместе с объективами внутри вращающегося барабана с пленочными поляроидами [39];

– индийский многоугловой видеополариметр (multi-angle polarization imager — MAPI), осуществляющий поляризационное зондирование в нескольких спектральных диапазонах — 0,4, 0,5, 0,65, 0,75, 0,85, 0,935 мкм под несколькими углами в диапазоне от 0 до 70° . Пространственное разрешение прибора в надире составляет 5 км для высоты 1000 км [40].

В Китае разработан сверхширокоугольный видеополариметр, получивший название Directional Polarimetric Camera (DPC) и Advanced Atmosphere Multi-angle Polarization Radiometer (AMPR). С их помощью проводятся регулярные измерения аэрозольного состава приземного слоя в различных городах и исследования отражательных характеристик различных природных образований [41, 42].

Обсуждение

Проведенный обзор научных исследований демонстрирует перспективность многоугольной стокс-видеополариметрии как в качестве средства повышения точности методов классического оптического ДЗ, так и в качестве универсального метода, обеспечивающего исчерпывающую информацию об оптических свойствах объектов в узком спектральном диапазоне. Тем не менее, обращает на себя внимание имеющееся несоответствие числа находящихся в опытной эксплуатации бортовых многоугольных видеополариметров и количества опубликованных и систематизированных результатов угловых измерений различных природных образований. Нам представляется, что сложившаяся ситуация обусловлена по крайней мере тремя причинами.

Первая причина связана с обсуждавшимся выше искажающим влиянием атмосферы на структуру сигнала. По оценкам, полученным на основании данных POLDER [40], носящим иллюстративный характер, вклад помехи обратного рассеяния в длинноволновом участке видимого диапазона, при измерении интенсивности излучения, отраженного от подстилающей поверхности в суммарный сигнал, возрастает линейно от направления в надир с 20% до 40% при угле визирования в 700. При этом при измерении линейной поляризации уже в надирном направлении доля поляризованного атмосферой излучения составляет 55%, однако с ростом угла визирования увеличивается незначительно до 60%. Значительная доля «поляризационной дымки» в структуре сигнала приводит к уменьшению отношения сигнал/шум изображений и нелинейному возрастанию шумов в изображениях при вычислении степени поляризации.

Вторая причина имеет фундаментальный характер и связана с осреднением информации по пространству. Поскольку «тонкие» поляризационные эффекты обусловлены взаимодействием излучения с микроструктурой вещества, то они нивелируются при осреднении по разнородной поверхности. Эти обстоятельства затрудняют интерпретацию результатов измерений отраженного от поверхности Земли излучения при малом пространственном разрешении, как, например, данных, получаемых от POLDER. Напротив, распределение аэрозоля представляет собой протяженную однородную пространственную структуру. По этой же причине наиболее успешными и повторяемыми являются результаты самолетных поляризационных измерений снежного покрова, песков, протяженных пространств, открытых почв, растительности, акваторий. Такие поверхности являются квазиоднородными, их статистические характеристики мало меняются при осреднении по площадям от десятков сантиметров до сотен метров. Для этого класса поверхностей могут быть получены оценки связи физико-минералогических и структурных свойств с данными поляризационных измерений в лабораторных условиях. Тем не менее, даже для таких поверхностей возможности решения обратной задачи ДЗ на основании поляризационных данных затруднено вследствие низкого отношения сигнал/шум. Математические трудности связаны некорректностью задачи обращения интегрального оператора первого рода [43]. При обращении подобных операторов появляется возможность возникновения ложных решений и осцилляций решения вследствие его крайней чувствительности к малым вариациям исходных параметров обратной задачи. Физически речь идет о необходимости привлечения дополнительной информации для создания алгоритма, фильтрующего ложные решения, а математически — об огрублении решения до соответствующего реальному объему исходной информации.

В этом смысле особое место в теории переноса занимают малопараметрические модели, в рамках которых прямая задача допускает приближенное аналитическое решение в общем виде без априорной информации о свойствах среды и последующее обращение этого аналитического решения,

поскольку численные решения не допускают подобной операции. При этом неизвестные фотометрические свойства среды выступают в качестве немногих эмпирически определяемых параметров решения, а вид последнего диктует необходимый состав вспомогательной экспериментальной информации для определения этих параметров.

Малопараметрическая модель уже не является некорректной математической задачей, если малые изменения совокупности ее параметров приводят к малым изменениям измеряемых характеристик, т. е. процесс создания такой модели представляет собой регуляризацию решения обратной задачи [43]. Следовательно, при условии, что число угловых отсчетов ПФК и соответствующее число уравнений превышают количество неизвестных в малопараметрической модели подстилающей поверхности, то возможно однозначное обращение. Для решения прямых и обратных задач многоугловой видеополяриметрии разработан специализированный математический аппарат, приспособленный для реализации быстрых алгоритмов [44–47].

Эффективность быстрого решения прямой задачи коррекции атмосферных искажений в темпе поступления информации определяется объемом дополнительной динамической информации об оптических свойствах слоя атмосферы между видеополяриметром и подстилающей поверхностью. Такая динамическая оценка атмосферы может быть получена косвенно от несканирующего датчика, чувствительного в ближнем УФ-диапазоне (0,3–0,35 мкм), в котором отражением солнечного излучения от поверхности можно пренебречь, а сигнал определяется доминирующим рассеянием Рэлея [48].

Третьей причиной незначительного числа результатов оценки пространственного распределения поляризационных параметров является избыточность информации, генерируемая многоугловыми многоспектральными видеополяриметрами, не позволяющая использовать ее для визуального анализа. Единичные стокс-изображения, полученные под любым из углов, непригодны для анализа, а непрерывные (восстановленные) ПФК — поляризационные сигнатуры, соотнесенные с каждым пикселем стокс-изображения, — невозможно отобразить. Единственным выходом из противоречия является нахождение характерных признаков

(скалярных величин) ПФК, которые были бы инвариантны к угловым условиям наблюдения и могли бы быть отображены в виде двумерного распределения.

Модельные эксперименты на ряде сыпучих микроструктурных объектов выявили, что наиболее вариативным признаком ПФК служит максимальная величина «отрицательной ветви» степени линейной поляризации. Поляризационными признаками (инвариантами) могут служить также максимальное значение положительной ветви степени поляризации, угол инверсии азимута поляризации, крутизна ПФК в точке прохождения через нуль.

При проведении многоугловых измерений во все не обязателен переход к оптическим параметрам слоя при обращении выражения для матрицы отражения. Напротив, названные параметры ПФК линейной поляризации сами по себе являются уникальными характеристиками подстилающей поверхности и пригодны для целей зондирования. Однако для перехода от них к физико-минералогическому составу вещества подстилающей поверхности необходимо создание банка соответствующих им параметров различных типов поверхности на базе их лабораторных измерений.

Заключение

Таким образом, в настоящее время имеются теоретические и экспериментальные предпосылки для более активного внедрения методов многоугловой видеополяриметрии в практику дистанционного зондирования подстилающих поверхностей. Необходимо активизировать работы в области накопления данных для формирования отечественного атласа поляризационных характеристик природных образований.

Авторы благодарят профессоров А. А. Романова и А. С. Селиванова за обсуждение материалов статьи.

Список литературы

1. *Розенберг Г. В.* Рассеяние света в земной атмосфере (Очерк к 150-летию открытия Араго поляризации света дневного неба и 100-летию открытия Гови

- поляризации света при рассеянии) // УФН, 1960, т. 81, вып. 2. С. 173–213.
2. *Tyo J. S., Goldstein D. L., Chenault D. B., Shaw J. A.* Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications // *Appl. Opt.*, 2006, vol. 45, no. 22. P. 5453–5469.
 3. *Schott J. R.* Fundamentals of Polarimetric Remote Sensing. SPIE Press, 2009.
 4. *Sun Xiao-bing, Qiao Yan-li, Hong Jin.* Review of Polarization Remote Sensing Techniques and Applications in the Visible and Infrared. // *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, № 3.
 5. *Gong Jie-qiong, Zhan Hai-gang, Liu Da-zhao.* A Review on Polarization Information in the Remote Sensing Detection // *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, vol. 30, no. 4. P. 1088–1095(8).
 6. *Snik F., Craven-Jones J., Escuti M., Fineschi S., Harrington D., Martino A., Mawet D., Riedi J., Tyo J. S.* An Overview of Polarimetric Sensing Techniques and Technology with Applications to Different Research Fields // *SPIE Proceedings Vol. 9099: Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing XI*, May 2014.
 7. *Zhao Y. G., Yi C., Kong S. G.* Multi-band Polarization Imaging and Applications (Advances in Computer Vision and Pattern Recognition), Springer, 2016, 206 p.
 8. *Розенберг Г. В.* Луч света (К теории светового поля) // УФН, 1977, т. 121, вып. 1. С. 97–138.
 9. *Tyo J. S.* Design of optimal polarimeter: maximization of signal-to-noise ratio and minimization of error // *Applied Optics*, 2002, vol. 41, no 4. P. 619–630
 10. *Аззам Р., Башара Н.* Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, с. 79.
 11. 200 лет астрономии в Харьковском университете / Под ред. Ю. Г. Шкуратова. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008. 632 с.
 12. *Walraven R.* Polarization imagery // *SPIE. Optical polarimetry*, 1977, v. 112. P. 164–167.
 13. *Prosh T., Hennigs D., Rascheke E.* Video polarimetry: a new imaging technique in atmospheric science // *Appl. Opt.*, 1983, v. 22. P. 1360–1362.
 14. *Селиванов В. А., Джаппаркулов Б. К., Цветков А. И., и др.* Техника телевизионной поляриметрии // *Техника кино и телевидения*, 1992, № 3. С. 38–43.
 15. *Egan W. G., Johnson W. R., Whitehead V. S.* Terrestrial Polarization Imagery Obtained from the Space Shuttle: Characterization and Interpretation // *Appl. Opt.*, 1991, vol. 30, no 4. P. 435–442.
 16. *Беляев Б. И., Зайцева В. А., Комар П. В. Б., Плюта В. И.* Малогабаритный скоростной спектрометр-поляриметр «МСС-СТОКС» // *Приборы и техника эксперимента*, 1989, № 1. С. 239.
 17. *Plass G. N., Kattawar G. W., Hitzfelder S. J.* Multiple scattered radiation emerging from Rayleigh and continental haze layers. 2: Ellipticity and direction of polarization // *Appl. Opt.* 1976, 15, 1003–1010.
 18. *Vedel M., Breugnot S., Lechocinski N.* Full Stokes polarization camera // *SPIE Proc. Vol9160-33, Optical Engineering+Application*, San Diego, Aug 21–25, 2011.
 19. *Brock N. J., Crandall C. Millerd J. E.* Snap-shot Imaging Polarimeter: Performance and Applications // *Proc. SPIE 9099, Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing XI*, 21 May 2014.
 20. *Devaraj C., Gartley M., Schott J.* Influence of polarization phenomenology on material discriminability using multi-view polarimetric imagery // *SPIE Proc. Polarization Science and Remote Sensing VI*, 2013, vol. 88730C.
 21. *Rivaere N., Ceolato R., Nespel L.* Multispectral polarized BRDF: design of highly resolved reflectometer and development of data inversion method // *Optica Applicata*, 2012, vol. XXII, no 1. P. 7–22.
 22. *Atkinson G. A., Hancock E. R.* Recovery of Surface Orientation From Diffuse Polarization // *IEEE Transactions on image processing*, 2006, vol. 15, no. 6. P. 1653–1664.
 23. *Lyot B.* Recherches sur la polarisation de la lumiere des planetes et de quelques substances terrestres // *Ann. Obs. Meudon*, 1929, vol. 8, no 1. P. 1–161.
 24. *Mishchenko M. I., Rosenbush V. K., Kiselev N. N., Lupishko D. F., Tishkovets V. P., Kaydash V. G., Bel'skaya I. N., Efimov Yu. S., Shakhovskoy N. M.* Polarimetric remote sensing of solar system objects. Kyiv: Akadempriodyka, 2010.
 25. *Kolokolova L.* Dependence of Polarization on Optical and Structural Properties of the Surfaces of Atmosphereless Bodies // *ICARUS 84*, 1990. P. 305–314.
 26. *Kolokolova L., Petrova E., Kimura H.* Effects of interaction of electromagnetic waves in complex particles/ *Electromagnetic Waves* (Ed. by V. Zhurbenko). InTech, 2011, 522 p.

27. Астахов И. Е., Будаков В. П., Лисицин Д. В., Селиванов В. А. Моделирование фотометрических и поляризационных характеристик сыпучих веществ // Тезисы докладов: Международный семинар «МЭИ. Светотехника-1992». С. 142–143.
28. Астахов И. Е., Будаков В. П., Лисицин Д. В., Селиванов В. А. Решение векторного уравнения переноса в малоугловой модификации метода сферических гармоник // Оптика атмосферы и океана, 1994, т. 7, № 6. С. 753–761.
29. Будаков В. П., Козельский А. В., Савицкий Е. Н. Улучшение сходимости метода сферических гармоник при сильно анизотропном рассеянии // Оптика атмосферы и океана, 2004, т. 17, № 1. С. 36–41.
30. Budak V. P., Korkin S. V. Mathematical model of the polarized light reflection by the turbid medium slab with an anisotropic scattering // Proc. SPIE, 2005, v. 5888. P. 363–370.
31. <http://smc.cnes.fr/POLDER/>
32. <http://smc.cnes.fr/PARASOL/>
33. <http://www-calipso.larc.nasa.gov/about/atrain.php>
34. <http://glory.gsfc.nasa.gov/a-train.html>
35. <http://glory.gsfc.nasa.gov/overview-aps.html>
36. <http://spacedynamics.org/programs/harp>
37. Morris M. N., Miller J., Brock N., Hayes J., Saif B. Dynamic phase-shifting electronic speckle pattern interferometer // <http://www.4dtechnology.com/reflib/>
38. Alexandrov M. D., Cairns B., Mishchenko M. I., Ackerman A. S. Characterization of Cloud Microphysical Parameters Using Airborne Measurements by the Research Scanning Polarimeter // International Radiation Symposium 2012, Berlin, Germany, 06–10 August 2012.
39. Будаков В. П., Гектин Ю. М., Лисицин Д. В., Селиванов В. А., Цветков А. И., Церетели Г. Г. Многоугловой видеополариметр для дистанционного зондирования подстилающей поверхности / Тезисы докладов: Симпозиум «Прикладная оптика-94» // СПб.: ИТМО, 1995. С. 86.
40. Satheesh S. K., Moorthy K. K. Multi-angle polarization imager: A satellite sensor for studies of continental aerosols // Current Science, 2007, 174, vol. 92, no. 2.
41. Han W., Xiaobing S., Jin H., Fangbin W. Review of Air-Borne and Space-Borne Polarized Remote Sensing of Aerosol over Land // Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2015, Issue: 2. P. 186–196.
42. Hai X. D., Fa G. X., Hai C. T., Tao Y., Qiang Li Z., Feng C. X., Hao C., Jing G. Initial research on the polarized reflectance of typical urban surface types measured by the Directional Polarimetric Camera // Science China Earth Sciences, 2011 Issue: 8. P. 1199–1205.
43. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974. 223 с.
44. Boudak V. P., Selivanov V. A. Multiangular videopolarimetry of an underlying surface // Proc. 31 Int. Symp. On Remote Sensing of Environment, June 20, Saint Petersburg, 2004.
45. Budak V. P., Korkin S. V. On the solution of a vectorial radiative transfer equation in an arbitrary three-dimensional turbid medium with anisotropic scattering // JQSRT, 2008, v. 109. P. 220–234.
46. Budak V. P., Korkin S. V. The spatial polarization distribution over the dome of the sky for abnormal irradiance of the atmosphere // JQSRT, 2008, v. 109. P. 1347–1362.
47. Kokhanovsky A. A., Budak V. P., Cornet C. et al. Benchmark results in vector atmospheric radiative transfer // JQSRT, 2010, vol. 111. P. 1931–1946.
48. Boudak V. P., Selivanov V. A. Videocorrection of the images of the underlying surface with use of the reference channel in the UV-spectrum region // Proc. 31 Int. Symp. On Remote Sensing of Environment, June 20, Saint Petersburg, 2004.