

Сравнение двух сценариев определения микроструктуры рассеивающего объекта лидарными системами дистанционного зондирования

Г.П. Арумов, А.В. Бухарин

*Институт космических исследований РАН
117997, Москва, Профсоюзная, 84/32
E-mail: tumbul@iki.rssi.ru*

Существующие оптические системы дистанционного зондирования до сих пор не позволяют достоверно определять параметры микроструктуры среды. Связано это с необходимостью решения обратной задачи. Предложенный подход заключается в восстановлении рассеивающего объекта, эквивалентного по оптическим свойствам исследуемому рассеивающему слою. Указанный объект состоит из монодисперсных частиц. Для определения микроструктуры эквивалентного объекта не требуется решать обратную задачу. Посредством указанного эквивалентного слоя можно проводить сравнение рассеивающих свойств атмосферы на разных расстояниях от источника частиц, сопоставив лидарному сигналу концентрацию частиц. Метод может быть использован для полидисперсных частиц.

Ключевые слова: лидар, рассеивающая среда, дистанционное зондирование, ореол, монодисперсные частицы, полидисперсные частицы, некорректная обратная задача.

Введение

Одним из основных средств дистанционного зондирования атмосферы в оптическом диапазоне является лидар (Fiocco, Smullin, 1963). Впечатляющей демонстрацией возможностей лидара является зарегистрированный сигнал от визуально невидимых удаленных слоев (Pershin et al., 1993). Задачи определения ширины слоя и его координаты относятся к задачам атмосферного мониторинга. В процессе зондирования могут быть определены только коэффициенты обратного рассеяния и экстинкции, которые являются базовыми коэффициентами рассеивающей среды.

Наиболее актуальной проблемой является определение микроструктуры среды. Существующие подходы основаны на решении некорректной обратной задачи с использованием спектральной зависимости базовых коэффициентов и априорную информацию об исследуемом объекте. Такой информацией может являться рассеянное исследуемым объектом излучение от посторонних источников света, оптические свойства зондируемого объекта, состав исследуемого аэрозоля и т.п.

Представим себе типичную задачу лидарного зондирования атмосферы, цель которой определение параметров микроструктуры аэрозоля. Источниками аэрозоля могут быть природные и промышленные объекты. Результатом зондирования являются базовые коэффициенты рассеяния на расстояниях от нескольких сотен метров до нескольких километров от источника. В процессе переноса воздушных масс эти коэффициенты меняются. Практический интерес представляет связь этих коэффициентов с базовыми параметрами микроструктуры аэрозоля, к которым относятся размеры и концентрация частиц. Если данная задача решена, то естественным ее продолжением является увеличение лидарных систем вокруг источника на разных расстояниях от него. Появляется возможность наблюдать пространственно-временную динамику распространения аэрозоля. Данная задача в настоящее время не имеет решения, поскольку из базовых коэффициентов зондирования нельзя достоверно определить функцию распределения частиц по размерам и их оптические свойства. Более того, субъективный характер методов решения обратной задачи не позволяет производить корректное сравнение восстановленных микрофизических характеристик среды различными лидарными группами.

В связи с этим возникает необходимость в построении такого сценария измерений, который позволял бы наглядно выстроить цепочку из минимального количества шагов, приводящих к восстановлению микроструктуры рассеивающих частиц. Каждый шаг представляет собой универсальный метод измерения промежуточной характеристики необходимой для получения конечного результата. Предлагаемый подход заключается в восстановлении микроструктуры слоя, который эквивалентен исследуемому слою по оптическим свойствам и состоит из монодисперсных частиц (Bukharin, 2007). Если размеры частиц эквивалентного слоя известны, то изменение лидарного сигнала можно однозначно связать с концентрацией частиц.

Сценарий с использованием спектральной зависимости базовых коэффициентов

Существующие методы определения параметров микроструктуры среды основаны на решении обратной задачи с использованием базовых коэффициентов на нескольких длинах волн. Отметим основные недостатки этих методов. Первый недостаток связан с проблемой достоверности восстановленных параметров частиц. Теоретический предел погрешности для восстановленной функции распределения частиц по размерам дает предварительное численное моделирование. Однако при решении обратной задачи существуют операции, для которых погрешность решения не определена. Например, выбор множителя Лагранжа на стадии регуляризации. Если этот множитель велик, то решение будет гладким, но не информативным, поскольку не соответствует реальному объекту. Если множитель Лагранжа мал, то решение становится сильно осциллирующим. Существующие способы выбора множителя Лагранжа оставляют открытой проблему оценки погрешности полученного решения, поскольку невозможно ответить на вопрос о том, каким осцилляциям соответствует реальная погрешность функции распределения частиц по размерам.

Следует отметить, что процедуры регуляризации может быть недостаточно для получения гладкого решения. Поэтому для одних случаев в выражение для регуляризации вводят слагаемые, отвечающие гладкости решения, и его производных. Для других случаев применяют процедуру усреднения решений внутри некоторого интервала. И здесь остается открытым вопрос о влиянии этих методов на погрешность полученного решения.

Второй недостаток – отсутствие измеряемого параметра, зависимость которого от размеров частиц имеет наглядную физическую интерпретацию. Действительно, измеряемые лидаром на нескольких длинах волн базовые коэффициенты зависят как от размеров, так и от концентрации частиц рассеивающего слоя. Только отношение коэффициента обратного рассеяния и экстинкции (лидарное отношение) может быть выбрано в качестве индикатора размера частиц, поскольку оно не зависит от концентрации частиц. Однако зависимость лидарного отношения от размеров частиц неизвестна и не имеет наглядного физического смысла. Для определения эффективного размера частиц требуются промежуточные расчеты по теории Ми. Такие расчеты невозможно произвести без априорной информации о показателе преломления и функции распределения частиц по размерам. Подобная информация часто либо недоступна, либо требует независимых измерений.

Существующие способы расчета эффективного размера частиц недостаточно универсальны, поскольку восстановленная функция распределения частиц по размерам может не иметь моментов. Тогда для оценки эффективного размера частиц требуется ограничение пределов интегрирования (Veslovskii, Kolgotin, 2002). При этом остается открытым вопрос об обоснованности такого ограничения. В качестве следствия укажем отсутствие возможности настройки параметров лидара на частицы с заданными размерами.

Вышеизложенные недостатки приводят к тому, что на отдельных этапах алгоритма восстановления микроструктуры аэрозоля возникает необходимость использования субъективного

фактора. В качестве примеров укажем выбор множителя Лагранжа, метод получения гладкого решения, метод определения индикатора размера частиц. Следовательно, существующие методы восстановления микрофизических параметров аэрозоля не позволяют использовать лидары для сравнительных измерений микроструктуры рассеивающих объектов.

Сценарий с использованием эквивалентного рассеивающего объекта

Как было отмечено во введении, перспективным подходом является восстановление микроструктуры некоторой эффективной среды. Например, если частицы внутри слоя являются монодисперсными, то базовые коэффициенты можно однозначно связать с концентрацией частиц. При распространении зондирующего пучка через этот слой вокруг него образуется ореол рассеяния. Если ореол рассеяния порождается дифракцией излучения на частицах слоя, то в приближении однократного рассеяния угловой размер ореола будет индикатором размера частиц. Чем меньше размер частиц, тем больше угловой размер ореола. Будем считать, при распространении в среде зондирующий пучок искажается только за счет появления такого ореола. Ранее обосновано следующее выражение для модели искажения пучка (Bukharin, 2002a)

$$z_g^{-2} = p/z^2 + (1-p)/z_h^2 \quad (1)$$

Здесь z_g – параметр дистанции, характеризующий трассовую зависимость интенсивности излучения на оптической оси искаженного пучка, p – коэффициент пропускания рассеивающего объекта, z – дистанция до некоторой точки на оптической оси пучка, прошедшего через рассеивающий объект, z_h – параметр дистанции, который характеризует трассовую зависимость интенсивности пучка на оптической оси только от ореола рассеяния. Физический смысл z_g определяет то расстояние вдоль оси пучка, на котором интенсивность неискаженного пучка на оптической оси равна интенсивности искаженного пучка. Очевидно, что при наличии поперечных искажений пучка z_g всегда будет больше z . В выражении (1) первое слагаемое в правой части определяет вероятность пропускания излучения рассеивающим объектом без искажений. Второе слагаемое определяет вероятность появления ореола.

Из выражения (1) необходимо определить z_h . Для этого ранее была предложена двухпозиционная схема зондирования (Bukharin, 2002b). В этой схеме оптическая ось одного из приемных каналов совмещена с оптической осью канала передатчика. Оптическая ось второго приемного канала смещена относительно первого на некоторое расстояние. Измеряются два сигнала и отношение между ними. Цель измерений – определить, как изменяется трассовая зависимость убывания сигнала при наличии искажений пучка. Это можно сделать посредством локальной калибровки (Bukharin, 2002b). Суть этой калибровки заключается в измерении трассовой зависимости отношения двух сигналов от плоской поверхности топографического объекта. Тогда при наличии искажений отношение сигналов изменяется и становится равным z_g . Это изменение определяет z_h из результатов локальной калибровки из (1).

После определения z_h можно найти угловой размер ореола φ_h из выражения (Bukharin, 2002a)

$$\varphi_h = \varphi_0 z_h / z, \quad (2)$$

здесь φ_0 – угловой размер пучка.

Следующая проблема заключается в нахождении связи между угловым размером ореола от зондирующего пучка φ_0 и угловым размером ореола φ_d от плоской волны. Логично сделать предположение о линейной зависимости углового размера ореола в приближении плоской волны от r^{-1} , где r – радиус частицы. Действительно, известно, что при дифракции плоской

волны на отверстии угловой размер главного максимума обратно пропорционален размеру отверстия (Ахманов и др., 1981). Зондирующий пучок можно представить в виде суперпозиции плоских волн. В таком представлении угловой размер ореола от зондирующего пучка будет линейно пропорционален угловому размеру ореола для плоской волны. В дальнейшем были получены предварительные экспериментальные подтверждения такой гипотезы (Bukharin, 2007), и для углового размера ореола обосновано следующее выражение

$$\varphi_h = \varphi_d + \varphi_0 \quad (3)$$

Тогда радиус частицы является измеримой величиной, поскольку связан с угловым размером ореола φ_d выражением:

$$r = C_3 \lambda / \varphi_d, \quad (4)$$

здесь C_3 – калибровочный коэффициент (Bukharin, 2002a), λ – длина волны, r – радиус частицы. Коэффициент калибровки C_3 можно определить посредством калибровочного объекта, например, среды с монодисперсными частицами с известным радиусом, или плоского прозрачного экрана со случайно расположенными на его поверхности непрозрачными пятнами с одинаковыми радиусами.

Если рассеивающий объект состоит из полидисперсных частиц, то при распространении через такой объект вокруг пучка образуется ореол. Угловому размеру ореола можно однозначно сопоставить эффективный радиус r_{ef} из (4).

Ранее была обоснована оптимальная схема измерений размера неоднородностей для случайного пропускающего экрана (СПЭ) (Bukharin, 2002a). Если СПЭ находится в непосредственной близости от лидара с двухпозиционной схемой зондирования, то оптимальными для измерений будут неоднородности радиусом равным отношению длины волны λ к угловому размеру зондирующего пучка φ_0 . Поскольку, обычно используемые длины волн порядка 1 мкм, угловой размер пучка 1 мрад, то оптимальными для измерений будут неоднородности радиусом 1 мм.

Это существенно ограничивает область применения предложенного подхода. Указанному размеру могут соответствовать только частицы в виде дождевых капель и снега. Максимальный интерес представляют частицы размерами порядка 1 мкм. Для расширения области применимости такого подхода необходимо использовать накопитель (аккумулятор) частиц в виде плоской прозрачной подложки. Такая подложка с осажденными на ней монодисперсными частицами может выступать как оптический эквивалент исследуемого рассеивающего объекта по лидарному отношению.

Следующая задача – определить размер этих частиц. Это можно сделать по цифровой фотографии неоднородностей через микроскоп. Пусть на фотографии сферические монодисперсные частицы представляет собой светлые круглые пятна на черном фоне. Эту фотографию можно скопировать на прозрачную плоскую поверхность, например, в виде пленки. На этой пленке частицам соответствуют участки с максимальным пропусканием $p \sim 1$, фону соответствует участки с минимальным пропусканием $p \sim 0$. Такая пленка представляет собой случайный пропускающий экран. Для этого экрана второе слагаемое в (1) много больше первого и размеры отверстий могут быть измерены достаточно точно. Зная коэффициент увеличения микроскопа и параметр эффективного размера прозрачных пятен, можно определить радиус частиц.

Рассмотрим случай полидисперсных частиц. Тогда фотография указанных частиц будет представлять собой темный фон с прозрачными круглыми пятнами разных размеров. Тогда эффективный размер прозрачных пятен определяется из (4). Затем, зная эффективный размер прозрачных пятен и увеличение микроскопа, определяем эффективный размер частиц.

Возникает вопрос о связи эффективного радиуса этих пятен, с функцией распределения частиц по размерам. Можно показать, что при $r_{ef} \ll C_3 \lambda / \varphi_0$ эффективный радиус пятен определяется следующим образом (Арумов, Бухарин, 2010):

$$r_{ef} = \sqrt{\frac{\langle r^4 \rangle}{\langle r^2 \rangle}} \quad (5)$$

Выражение (5) представляет собой корень из отношения моментов четвертого и второго порядков для функции распределения частиц по радиусам. Указанные моменты всегда существуют, поскольку число частиц на подложке конечно.

После получения параметра эффективного размера частиц исследуемый рассеивающий объект, например, в виде слоя, можно представить как слой монодисперсных частиц. Концентрация частиц в слое определяется концентрацией эффективных частиц. Для этого достаточно измерить пропускание слоя. Этот коэффициент представляет собой произведение концентрации частиц на площадь их поперечного сечения. Таким образом, в результате измерений получаем эффективный размер и концентрацию частиц в слое.

Для задачи, изложенной во введении, каждая лидарная станция может быть откалибрована по эффективному радиусу с использованием прозрачной подложки, на которой осаждаются частицы. Подложка является аккумулятором частиц и эквивалентна рассеивающему слою по лидарному отношению. Затем из этой подложки создается случайный пропускающий экран, посредством которого определяем r_{ef} . После этого лидарному сигналу можно сопоставить концентрацию частиц.

Обсуждение

Для нахождения эффективного радиуса нет необходимости восстанавливать функцию распределения частиц по размерам посредством решения обратной задачи. Метод не использует промежуточных расчетов по теории Ми, не требует знания информации о коэффициенте преломления и функции распределения частиц по размерам. В отсутствии обратной задачи проблема достоверности имеет наглядную интерпретацию на каждом этапе калибровок и измерений. Недостатком такого сценария является необходимость проведения измерений *in situ* для нахождения r_{ef} . Такие измерения, по сути, используют забор проб для аэрозоля. Однако, использование прямых измерений допускает дальнейшее развитие метода для несферических частиц. Особенность использования сценария с эквивалентным экраном предполагает наличие трех универсальных шагов для получения конечного результата. Первый шаг предварительные измерения. На этом этапе следует измерить поле зрения приемного канала. Эта операция может быть универсальной при использовании случайного пропускающего экрана, который порождает заданное искажение поля зрения. Второй шаг локальная калибровка, цель которой определить зависимость параметра перекрытия поля зрения по отношению к источникам света, сдвинутым относительно друг друга на заданное расстояние. Третьим шагом является микрофизическая калибровка, позволяющая связать размер неоднородности с угловым размером ореола.

Вернемся к задаче определения пространственно временной динамики микроструктуры среды вокруг источника аэрозоля. Допустим, для каждой лидарной станции произведена микрофизическая калибровка. Если размер аэрозоля не меняется, то в результате можно измерить временную динамику концентрации аэрозоля. Если размеры частиц меняются, то возникает необходимость контроля постоянства микроструктуры рассеивающей среды. Решение такой задачи возможно различными методами, например, посредством зондирования на нескольких длинах волн, или с использованием забора проб. В общем случае

методы контроля микроструктуры среды требуют дальнейших исследований. Однако, задача контроля постоянства рассеивающих свойств среды не является обратной и поэтому предложенный метод имеет перспективы для проведения сравнительных измерений микрофизических параметров слоя оптическими системами дистанционного зондирования.

Литература

1. *Арумов Г.П., Бухарин А.В.* Анализ зависимости между угловым размером ореола, найденного с использованием граничных дифракционных волн, и функцией распределения неоднородностей по размерам // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2010. Т.7. №4. С. 27–33.
2. *Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С.* Введение в статистическую радиофизику и оптику / М.: Наука. 1981. 640 с.
3. *Bukharin A.V.* Two-position Scheme Applied for Determination of Microphysical Properties of Random Transmitting Screen // *Physics of Vibrations*, 2002a, Vol. 10, №3, P. 177–184.
4. *Bukharin A.V.* Two-position Scheme Applied for Determination of Microphysical Properties of Scattering Media // *Physics of Vibrations*, 2002b, Vol. 10, №4, P. 228–235.
5. *Bukharin A.V.* Experimental Validation of the Scenario of the Object Microstructure Determination Using a Two-Position Lidar System: a Screen with Random Transmittance Modulation // *Physics of Wave Phenomena*, 2007, Vol. 15, №3, P. 1–10.
6. *Fiocco G., Smullin L.D.* Detection of Scattering Layers in the Upper Atmosphere (60–140 km) by Optical Radar // *Nature*, 1963, Vol. №199, P. 1275–1276.
7. *Veslovskii I., Kolgotin A., Griaznov V., Muller D., Wandinger U., Whiteman D.N.* Inversion with regularization for the retrieval of tropospheric aerosol parameters from multiwavelength lidar sounding // *Applied optics*, 2002, Vol. 41, №18, P. 3685–3699.
8. *Pershin S.M., Linkin V.M., Bukharin A.V., Makarov V.S., Kouki T., Prochazka I., Kuznetsov V.I.* Compact eye-safe Lidar for environmental media monitoring // *SPIE's Special issue «Optical Monitoring of the environment»*. 1993. Vol. 2107. P. 336–362.

Comparison of two scenarios of definition of a microstructure of scattering object by the lidar for remote sensing

G.P. Arumov, A.V. Bukharin

*Space Research Institute of RAS
Profsoyuznaya Str., 84/32, Moscow, 117997
E-mail: tumbul@iki.rssi.ru*

At present optical systems for remote sensing can not define microstructure of the scattering medium because of the ill posed inversion problem. The proposed method is based on retrieval of the equivalent scattering layer. This layer has a lidar ratio equal to that one of a real layer and consists of monodisperse particles. The ill-posed inversion problem is not required to retrieve the equivalent scattering layer. Using the proposed method we can compare concentration of particles at different distances from the particle source. The proposed method can be applied to polydisperse particles.

Keywords: lidar, scattering medium, remote sensing, halo, monodisperse particles, polydisperse particles, ill-posed inversion problem.