

Проблемы использования уравнения переноса излучения в задачах дистанционного зондирования рассеивающих сред

Г.П. Арумов, А.В. Бухарин, Н.С. Ерохин

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

На основе уравнения переноса излучения (УПИ) в общем случае нельзя предложить метода определения углового размера гало, которое возникает вокруг пучка при его распространении в рассеивающей среде. Для интерпретации результатов зондирования из УПИ требуется измерение дополнительных параметров, например, альbedo однократного рассеяния, фазовой функции. В связи с этим для восстановления микроструктуры рассеивающего объекта посредством УПИ требуется значительный объем априорной информации. Решение базовой задачи зондирования возможно на основе двухпозиционных схем. Однако, используемая для этого модель требует использования граничных дифракционных волн для интерпретации геометрии гало, что не согласуется с УПИ.

Введение

Одна из возможных причин, из-за которой лидарные методы не имеют широкого применения, связана с трудностями существующих представлений о распространении светового пучка в рассеивающей среде. Формальный подход к решению таких задач основан на использовании уравнения переноса излучения (УПИ). В УПИ входит набор основных параметров необходимых для описания результатов зондирования. К этим параметрам относятся альbedo однократного рассеяния, коэффициент экстинкции, индикатриса рассеяния. Из результатов зондирования в лучшем случае возможно получение только коэффициентов обратного рассеяния и экстинкции [1]. На основе этих коэффициентов нельзя восстановить базовые микрофизические свойства среды (размеры и концентрация частиц) без использования значительного объема априорных предположений. Это привело к тому, что задачи, в которых лидар используется для получения информации о микрофизических свойствах среды, являются уникальными. При этом даже на примере этих случаев нельзя продемонстрировать наглядные примеры получения информации о микроструктуре среды без использования методов решения обратной некорректной задачи [2]. В работе проанализированы методические трудности, являющиеся препятствиями для распространения УПИ на задачи дистанционного зондирования.

Основное лидарное уравнение

Рассмотрим трассу, ограниченную поверхностью тест-объекта. Зондирование производится импульсным лидаром упругого рассеяния. Максимальную интенсивность сигнала от поверхности такого объекта в приближении однократного рассеяния обычно моделируют посредством основного лидарного уравнения (см. [1])

$$S(z) = S_0 A(z) O(z) \exp(-2\sigma z)/z^2, \quad (1)$$

здесь S_0 – сигнал от поверхности тест-объекта, $A(z)$ – эффективная апертура передающего канала, $O(z)$ – геометрический форм-фактор поля зрения и зондирующего пучка, z – дистанция до поверхности тест-объекта, находящегося в непосредственной близости от лидара, σ – коэффициент экстинкции.

Если схема зондирования идеальная ($O(z)=1$, [3]) и тест-объект находится на дистанции для которой $A(z)=1$, то (1) преобразуется к виду

$$S(z) = S_0/z^2. \quad (2)$$

Пусть оптические оси приемного и передающего каналов лидара перекрывает экран со случайной модуляцией коэффициента пропускания (случайный пропускающий экран (СПЭ)). Тогда угловой размер пучка и поле зрения приемного канала увеличиваются за счет образования диффузного гало. Энергия пучка частично переходит в энергию диффузного гало. Трассовая зависимость сигнала от тест-объекта (2) уменьшается быстрее, чем без СПЭ. Эту зависимость вместо (2) представим в виде выражения

$$S(z) = S_0/z_g^2 = S_0 (p^2 z^{-2} + (1-p^2) z_h^{-2}) \quad (3)$$

Здесь p – коэффициент пропускания СПЭ, z_h параметр дистанции. Физический смысл этого параметра заключается в том, что при наличии искажения пучка сигнал от тест-объекта уменьшается, как если бы объект находился на расстоянии z_g . Если коэффициент пропускания СПЭ мал $p \ll 1$, то практически вся энергия прошедшего пучка будет преобразована в энергию гало. Тогда первое слагаемое в (3) близко к нулю, и трассовая зависимость сигнала от тест-объекта будет определяться вторым слагаемым. Дистанция $z_h = z_g$.

Такой же результат справедлив, если оптические оси лидара пересекает фазовая пластинка. Тогда на выходе из СПЭ геометрически неискаженная часть пучка отсутствует, и в этом смысле можно принять $p = 0$. Сигнал будет уменьшаться только за счет углового увеличения пучка. Тогда $z_g = z_h$ (физический смысл z_g обсуждался выше).

В промежуточном случае (3) представляет собой суперпозицию сигналов от двух распределений интенсивностей; первое слагаемое представляет собой трассовую зависимость сигнала от неискаженной части пучка, второе слагаемое представляет собой трассовую зависимость сигнала от диффузного гало.

Выражение (3) является методической основой измерения параметра углового размера диффузного гало лидаром с ДПС. Если угловой размер зондирующего пучка φ_0 , то параметр углового размера гало φ_h определяется как

$$\varphi_h = \varphi_0 z_h / z \quad (4)$$

здесь z_h и z дистанции, смысл которых обсуждался выше см (3).

Выражение (3) допускает два подхода к определению геометрии гало. В первом подходе в качестве p используют коэффициент пропускания (поглощения). Тогда для интерпретации гало необходимо использовать граничные дифракционные волны. Первое слагаемое представляет собой вклад от лучей, не пересекающих неоднородности СПЭ, второе слагаемое содержит в себе граничные дифракционные волны [4].

Во втором подходе в (3) используется коэффициент экстинкции. Тогда первое слагаемое представляет собой вклад от геометрически неискаженной части пучка, второе слагаемое является результатом дифракции пучка на неоднородностях СПЭ. Для описания геометрии гало можно использовать дифракционную теорию Кирхгофа [4].

Таким образом, для моделирования геометрии пучка в (3) используются чисто статистические методы. С вероятностью p пучок проходит СПЭ без искажений, а с вероятностью $1-p$ превращается в гало.

Если использовать коэффициент пропускания (поглощения), то набора лидарных данных достаточно для нахождения коэффициента пропускания и углового размера гало [3]. При этом выражение (3) не согласуется с УПИ, поскольку вместо коэффициента экстинкции в нем используется коэффициент пропускания.

Выражение (3) согласуется с УПИ в случае использования в качестве p коэффициента экстинкции. Однако, в общем случае, не существует метода его нахождения из данных зондирования. Измерение коэффициента экстинкции в принципе возможно, только если параметр гало много больше угловой ширины пучка. Такое приближение является удобным для интерпретации на

основе УПИ и соответствует рассеянию плоской волны частицами среды [5]. Для практических задач зондирования указанный случай является уникальным.

Вернемся к уравнению (1). При распространении пучка через статистические неоднородности среды происходит рассеяние и поглощение пучка. Эти эффекты учитываются только посредством экспоненциального множителя. Однако, наличие таких эффектов в общем случае приводит к изменениям геометрии пучка за счет образования гало. Следовательно, основное лидарное уравнение упругого рассеяния (1) является внутренне противоречивым.

Модель геометрии пучка

УПИ содержит в себе выражение для геометрии диффузного гало $J_g(\mathbf{s})$ в виде следующего слагаемого [5]:

$$J_g(\mathbf{s}) = \int_{4\pi} p(\mathbf{s}; \mathbf{s}') I(\tau; \mathbf{s}') d\omega', \quad W_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} p(\mathbf{s}; \mathbf{s}') d\omega \quad (5)$$

здесь $p(\mathbf{s}; \mathbf{s}')$ – фазовая функция (описать направления $\mathbf{s}; \mathbf{s}'$), $I(\tau; \mathbf{s}')$ – интенсивность зондирующего пучка, прошедшего оптическую толщину $\tau = \sigma z$ на дистанции, z – дистанция, σ – коэффициент экстинкции, W_0 – альbedo однократного рассеяния. Из (5) видно, что для расчета геометрии диффузного гало необходимо знать фазовую функцию $p(\mathbf{s}; \mathbf{s}')$ и альbedo однократного рассеяния W_0 .

Использование коэффициента экстинкции в УПИ приводит к необходимости промежуточных измерений альbedo однократного рассеяния. При крайнем дефиците оптических параметров, полученных в результате зондирования, в УПИ имеется дополнительное неизвестное W_0 , от которого зависит решение базовой задачи зондирования. Обычно для устранения такого дефицита используют априорную информацию о зондируемой среде, что ставит под вопрос достоверность решения базовой задачи зондирования.

Для описания искажения пучка на основе УПИ используются угловые моменты фазовой функции или радиальные моменты распределения освещенности. В качестве углового параметра рассеяния вперед используют комбинацию между угловыми моментами, например, в малоугловом приближении для определения дисперсии и эксцесса углового распределения яркости используют угловые моменты второго и четвертого порядков [6].

В задачах лидарного зондирования основная энергия зондирующего пучка сосредоточена в пределах малого телесного угла. Тогда из (5) следует, что геометрия рассеяния частицами практически совпадает с геометрией фазовой функции. Угловая геометрия гало в передней полусфере совпадает с фазовой функцией. Однако, угловые моменты зависят от обратного рассеяния даже для сильно асимметричных фазовых функций. В лидарных задачах желательно чтобы угловой параметр рассеяния вперед определялся по передней полусфере фазовой функции. Тогда не будет зависимости от обратного рассеяния. Этот вывод является наглядным для непрозрачных пятен (например, белых и черных) на СПЭ. Такие пятна по-разному рассеивают в заднюю полусферу и одинаково в переднюю полусферу. Очевидно, что параметры углового размера гало и коэффициент пропускания должны быть одинаковы в обоих случаях. Следовательно, для дистанционных измерений важно получить параметр гало по данным только передней полусферы. Тогда можно ожидать зависимости ширины поперечного распределения освещенности на тест-объекте только от размеров непрозрачных пятен на СПЭ (частиц внутри слоя). При этом отсутствует зависимость от обратного рассеяния, альbedo однократного рассеяния и экстинкции.

Определение параметра углового размера гало является отдельной задачей. Для сильно асимметричной фазовой функции часто используют модель гауссова распределения по углам. Тогда поперечное распределение освещенности от гало должно быть близко к гауссову распределе-

нию. Угловой параметр гало можно определить только по этому распределению, например, как среднеквадратичное отклонение для поперечного распределения освещенности на поверхности тест-объекта. Рассмотренный метод не может быть обоснован с точки зрения волновой природы света. Действительно, даже для идеального случая дифракции плоской волны на отверстии поперечное распределение освещенности описывается кольцами Эри. Это распределение не имеет моментов по поперечным координатам в плоскости тест-объекта (интеграл расходится). Этот вывод справедлив для монодисперсных частиц.

Для решения задачи необходимы дополнительные требования, например, геометрия зондирующего пучка должна быть гауссовой и распределение частиц по размерам должно быть гауссовым. Однако, в этом случае методы, основанные на использовании УПИ, не обладают достаточной универсальностью для решения базовой задачи зондирования. С практической точки зрения для калибровки лидара необходимо использовать рассеивающие частицы, распределение по размерам, у которых гауссово (полидисперсные). Это требование не выполняется для монодисперсных частиц. Очевидно, применимость метода не должна зависеть от вида распределения частиц по размерам.

Таким образом, использование угловых моментов при определении углового размера гало не может быть обоснованным.

На основе ДПС возможен наглядный сценарий решения базовой задачи зондирования без использования методов решения обратной некорректной задачи. В этом случае параметр гало можно найти на основе использования выражений (3) и (4) только по сигналу от поверхности тест-объекта. При этом для определения параметра углового размера гало не требуется существование моментов для поперечного распределения освещенности. Такой подход позволяет однозначно сопоставить данным зондирования некоторый СПЭ, который дает такое же искажение и поглощение, как исследуемый рассеивающий объект. Такие преимущества делают перспективными использование ДПС-лидаров для решения базовых задач зондирования рассеивающих сред.

Заключение

Задачи лидарного зондирования характеризуются дефицитом данных о рассеивающем объекте. Возможно получение только коэффициента обратного рассеяния и экстинкции. Набора этих параметров недостаточно для решения базовой задачи зондирования на основе УПИ. Для решения базовой задачи необходимы параметры углового размера гало и коэффициента экстинкции. Тогда на основе УПИ можно выразить лидарный сигнал через коэффициент экстинкции и угловой размер гало. Для описания геометрии гало можно использовать дифракционную теорию Кирхгофа [4]. Однако, из данных зондирования обычными лидарами упругого рассеяния невозможно одновременное получение коэффициента экстинкции и углового размера гало.

Для прямого решения базовой задачи зондирования достаточно выразить лидарный сигнал через коэффициент пропускания (коэффициент поглощения) и параметр углового размера гало. Эти параметры одновременно определяются по результатам зондирования лидаром с ДПС. Предложенная форма лидарного сигнала не согласуется с УПИ. Такой подход требует использования граничных дифракционных волн для интерпретации геометрии гало.

Литература

1. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. М.:Мир. 1987. 550 с.
2. *Veselovskii I., Kolgotin A., Griaznov V., Muler D., Wandinger U., Whiteman D. N.*, Inversion with regularisation for the retrieval of tropospheric aerosol parameters from multiwavelength lidar sound-

- ing. Appl. Opt. 2002, Vol. 41, No. 18, 3685-3699.
3. *Арумов Г. П., Бухарин А. В., Ерохин Н. С.* Метод определения микрофизических параметров рассеивающих сред двухпозиционными схемами зондирования // Препринт ИКИ РАН, Пр-2095, 2003, 20 стр.
 4. *Born M. and E. Wolf*, Principles of Optics, 4th ed. (Oxford and New York: Pergamon Press, 1970).
 5. *Ishimaru A.*, Wave Propagation and Scattering in Random Media, Vol. 2, Multiple Scattering, Turbulence, Rough Surfaces and Remote Sensing. New York: Academic Press, 1978.
 6. *Katsev I., Zege E. P., et al.* J. Opt. Soc. of Amer. A, 1997, Vol. 14, 1338.