

К вопросу об интерпретации базовых лидарных коэффициентов для лидара обратного рассеяния

Г. П. Арумов, А. В. Бухарин

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: tumbul@iki.rssi.ru*

Проанализированы возможности миниатюрного лидара упругого рассеяния, имеющего оптимальную коаксиальную схему зондирования. В такой схеме геометрический форм-фактор постоянен вдоль всей трассы. Для моделирования формы лидарного сигнала из однородной атмосферы без ослабления (аппаратной функции) на трассах с фиксированной дальностью могут использоваться стандартные экраны с модуляцией коэффициента пропускания. В отличие от обычных лидаров калибровка для измерения коэффициента обратного рассеяния может производиться как с применением стандартных рассеивающих поверхностей с известной угловой диаграммой обратного рассеяния, так и посредством отражающих сфер. Интерпретация микрофизических параметров рассеивающего слоя основана на применении модели эквивалентного слоя, состоящего из монодисперсных частиц. Микроструктура эквивалентного слоя определяется по измерениям сигналов обратного рассеяния на частицах рассеивающей среды с использованием ненормализованных моментов первого и второго порядков. Обосновано применение дифференциального сечения обратного рассеяния на отдельной частице для измерения концентрации эквивалентных частиц по коэффициенту обратного рассеяния. Предложенный способ актуален в задачах дистанционного зондирования приземных трасс лидарами с предельно малой энергией в импульсе с последующей микрофизической интерпретацией базовых коэффициентов.

Ключевые слова: коаксиальная схема, оптимальная схема, коэффициент обратного рассеяния, калибровка, эквивалентное сечение, ненормализованный момент, эквивалентная среда, концентрация, дистанционное зондирование, проводящая сфера, перфорированный экран, рассеивающий слой, геометрический форм фактор, лидар упругого рассеяния

Одобрена к печати: 05.12.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-283-290

Введение

Приземный слой атмосферы характеризуется большим разнообразием оптических и физических свойств частиц (Izhovkina et al., 2018). В этом случае основной предпосылкой применения лидара упругого рассеяния для зондирования указанного слоя представляется разработка принципов сопоставления базовым лидарным коэффициентам микроструктуры рассеивающего слоя. Указанная задача включает в себя две стадии. Первая заключается в создании оптимальных зондирующих систем. Эти системы характеризуются максимально упрощёнными способами калибровки и настройки. Кроме того, для таких систем аппаратная функция должна быть известна или её измерение должно использовать прямые методы. Аппаратной функцией представляется форма обратного сигнала из однородной атмосферы с пренебрежимо малым коэффициентом ослабления. Отметим преимущества оптимальных схем зондирования (ОС). К лидарам с ОС относятся схемы, в которых поле зрения равно угловым размерам пучка на всей дистанции, а оптические оси параллельны или совпадают. Для этой системы аппаратная функция может быть получена на ограниченных трассах с применением специальных экранов, дающих заданное увеличение поперечных размеров пучка и поля зрения (Арумов и др., 2014). С помощью таких экранов на трассах с фиксированной дальностью можно экспериментально моделировать зависимость обратного сигнала от расстояния. Для измерения базовых коэффициентов (коэффициент обратного рассеяния — КОР, коэффициент экстинкции — КЭ) необходимо измерить обратный сигнал от объекта с известными рассеивающими свойствами. Для ОС измерения обратного сигнала в некоторой точке

трассы достаточно для восстановления коэффициента обратного рассеяния вдоль всей трассы. Отметим, что КОР выступает основной величиной, измеряемой дистанционными методами. Второй коэффициент, КЭ, может быть измерен только при определённых условиях (зондирование трасс с фиксированной дальностью с топографическим объектом на конце, по спаду обратного сигнала, по независимым измерениям с использованием многопроходных методов, посторонних источников света и т. д.).

Вторая стадия заключается в микрофизической интерпретации обратного сигнала для приземного слоя атмосферы. Обратный сигнал обусловлен рассеянием на аэрозолях и молекулах воздуха. Вклад молекулярного рассеяния может быть найден применением термодинамической модели атмосферы. В этом случае молекулярную составляющую КОР можно интерпретировать через основные термодинамические параметры атмосферы. Концентрацию молекул для чисто молекулярной атмосферы можно определять по термодинамическим параметрам и закону Авогадро. Концентрация молекул при нормальных условиях определяется числом Лошмидта (Measures, 1984). Такая интерпретация применима для атмосферы, состоящей из смеси различных газов. Аэрозольная составляющая КОР в большинстве случаев представляет основной интерес для исследуемого рассеивающего объекта. В общем случае обратный сигнал зависит от функции распределения частиц по размерам, оптических и физических свойств частиц. В такой ситуации методы решения некорректной обратной задачи (Veselovskii et al., 2002) для восстановления микроструктуры рассеивающего объекта неприменимы. Микрофизическая интерпретация КОР из минимального набора коэффициентов (КОР и КЭ) может быть основана только на интерпретации рассеивающей среды как эквивалентной. Эквивалентная среда состоит из монодисперсных частиц с эквивалентными сечениями. Такая среда даёт такие же базовые коэффициенты и угловую трансформацию пучка, как исследуемая среда. Если для данного рассеивающего объекта известно эквивалентное сечение, то базовым коэффициентам можно сопоставить концентрацию эквивалентных частиц. Появляются возможности для микрофизической интерпретации указанных коэффициентов через микроструктуру эквивалентной среды. Метрологическое обеспечение метода основано как на однозначных переходах от измеряемых коэффициентов к эквивалентной среде, так и на переходе от исследуемой среды к эквивалентной среде. Для оптимальных коаксиальных схем зондирования лидарное уравнение имеет наиболее простой вид из-за постоянства геометрического форм-фактора приёмного и передающего каналов вдоль линии зондирования. В этой связи представляют интерес вопросы, связанные с калибровкой и измерением микроструктуры рассеивающего слоя указанными зондирующими системами. В настоящей работе рассмотрены вопросы совместного применения контактных и лидарных методов в задаче восстановления микроструктуры эквивалентной среды. Это позволяет проводить микрофизическую интерпретацию рассеивающего слоя через микроструктуру эквивалентной среды.

Калибровка сигнала обратного рассеяния

Ранее для зондирования приземного слоя атмосферы был предложен лидар обратного рассеяния с идеальной коаксиальной схемой зондирования (Бухарин и др., 2016). В таком лидаре приёмник и источник излучения совмещены, а поле зрения и угловой размер пучка совпадают на всей дистанции. Для проводящей сферы радиуса R дифференциальное сечение рассеяния назад составит:

$$d\sigma_{\pi}/d\Omega = R^2/4.$$

Для измерения КОР от слоя атмосферы на расстоянии z следует измерить сигнал обратного рассеяния от находящейся на этом расстоянии проводящей сферы. В работе (Арумов и др., 2022) представлено следующее соотношение для определения КОР:

$$\frac{\Delta I_{\beta}(z)}{I_R(z)} = \frac{\beta(z)\pi\varphi^2 z^2 \Delta z}{R^2}, \text{ или } \beta(z) = \frac{R^2}{\pi\varphi^2 z^2} \cdot \frac{1}{I_R(z)\Delta z} \Delta I_{\beta}(z). \quad (1)$$

В приведённом выражении $I_R(z)$ — интенсивность регистрируемого приёмным каналом лидара света от находящейся на расстоянии z от лидара проводящей сферы; $\Delta I_\beta(z)$ — регистрируемая приёмным каналом мощность сигнала обратного рассеяния от слоя толщиной Δz , находящегося на расстоянии z от лидара; Φ_0 — поле зрения приёмного канала вблизи слоя; $\beta(z)$ — коэффициент обратного рассеяния внутри находящегося на расстоянии z слоя.

Выражение (1) — наиболее простая форма для калибровки обратного сигнала, измеренного коаксиальной зондирующей схемой. Применение проводящей (зеркальной) сферы имеет преимущества по сравнению с плоскими рассеивающими поверхностями. Для такой сферы известен коэффициент отражения назад. Обратный сигнал от такой сферы сравним с обратным сигналом из атмосферы.

Таким образом, для оптимальной коаксиальной схемы зондирования применим новый метод калибровки по обратному сигналу от проводящей сферы. При этом для рассматриваемой схемы зондируемый объём определяется оптическими характеристиками приёмного и передающего каналов и пространственным разрешением вдоль линии зондирования или шириной исследуемого слоя. Оптимальная конфигурация лидара с коаксиальной схемой даёт возможность измерить форму обратного сигнала из однородной атмосферы на трассах с фиксированной дальностью с применением набора стандартных экранов с монодисперсными отверстиями.

Отметим, что для калибровки обычных лидаров упругого рассеяния могут использоваться калиброванные плоские поверхности с известной угловой диаграммой рассеяния (Kavaya, Menzies, 1985). Однако такие измерения характеризуются значительными техническими трудностями, связанными с необходимостью применения аттенюаторов для ослабления обратного сигнала и возможным наличием зеркальной составляющей. Эти факторы приводят к искажениям геометрического форм-фактора приёмного и передающего каналов во время измерений.

Применение проводящих сфер делает возможным получение обратного сигнала, сравнимого по величине с сигналом обратного рассеяния из атмосферы. Действительно, для оптического диапазона коэффициент обратного рассеяния из молекулярной атмосферы составляет величину на уровне $2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1} \cdot \text{стр}^{-1}$ (Measures, 1984). Эту величину можно смоделировать находящейся в единице объёма проводящей сферой диаметром $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Для приземного слоя атмосферы КОР составляет величину на уровне $10^{-5} \text{ м}^{-1} \cdot \text{стр}^{-1}$, что соответствует сфере диаметром $1,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. Сфере диаметром 1 см соответствует КОР на уровне $6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1} \cdot \text{стр}^{-1}$. Изготовление проводящих сфер не представляет серьёзных технических трудностей. Для рассматриваемой оптимальной коаксиальной схемы зондирования достаточно получить сигнал от сферы в одной точке для полной калибровки вдоль всей трассы.

Концентрация эквивалентных частиц

Рассмотрим применение контактных методов для нахождения концентрации эквивалентных частиц внутри слоя. Основные параметры эквивалентной среды можно выразить через ненормализованные моменты для интенсивности света i_m , рассеянного отдельной частицей с номером m . Ненормализованный $E^\Sigma(i^k)$ и нормализованный $E(i^k)$ моменты порядка k для указанной интенсивности определяются как:

$$E^\Sigma(i^k) = \sum_{m=1}^N i_m^k, \quad E(i^k) = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N i_m^k, \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

Здесь i_m — интенсивность рассеянного m -й частицей света; N — количество частиц. Из выражений (2) следует различие между ненормализованными моментами $E^\Sigma(i^k)$ и моментами для функции распределения $E(i^k)$. Это различие заключается в отсутствии нормировки для ненормализованных моментов.

Такая особенность приводит к тому, что ненормализованный момент может иметь физический смысл. Например, пропускание слоя или экрана, созданного по изображениям

частиц, зависит от ненормализованного момента первого порядка. Поперечное искажение пучка зависит от ненормализованного момента второго порядка. Эквивалентное сечение частиц, определяющее поперечное искажение пучка и поля зрения приёмного канала, выражается через отношение ненормализованного момента второго порядка к ненормализованному моменту первого порядка. Обобщённое выражение для концентрации эквивалентных частиц и обратного рассеяния на эквивалентной частице выражается через отношение моментов:

$$N_{k,k-1} = \frac{[E^\Sigma(i^{k-1})]^k}{[E^\Sigma(i^k)]^{k-1}}, \quad k = 2, 3, \quad (3)$$

$$i_{k,k-1} = \frac{E^\Sigma(i^k)}{E^\Sigma(i^{k-1})}, \quad k = 2, 3. \quad (4)$$

Для измерения $N_{k,k-1}$ могут быть использованы 3d-экраны, изготовленные по снимкам частиц (Арумов, Бухарин, 1918), и цифровые фотографии. Из выражений (3) и (4) следует, что для монодисперсных частиц, $i_0 = i_1 = i_2 = i_3 = \dots = i_k$, $k = N$, и для ненормализованных моментов получаем $i_{k,k-1} = i$ и $N_{k,k-1} = N_0$.

Допустим, поперечные сечения частиц подчиняются логнормальному распределению. Тогда концентрация частиц будет зависеть от порядка используемых ненормализованных моментов, и для неё будем иметь:

$$N_{k,k-1} = N_0 \exp(-\sigma^2 k(k-1)).$$

Одна из ключевых величин — концентрация эквивалентных частиц $n_{2,1}$. Для логнормального распределения указанная концентрация определяется выражениями:

$$N_{2,1} = \frac{[E^\Sigma(i)]^2}{E^\Sigma(i^2)} = N_0 \exp(-\sigma^2), \quad n_{2,1} = \frac{N_{2,1}}{V}. \quad (5)$$

Здесь символом V обозначен объём, содержащий $N_{2,1}$ эквивалентных частиц. Из второго равенства выражения (5) следует, что эквивалентная концентрация $n_{2,1}$ зависит только от параметра ширины распределения σ . Отсюда вытекает основное преимущество использования концентрации эквивалентных частиц $n_{2,1}$ как базовой характеристики микроструктуры рассеивающего объекта. Если количество частиц N_0 представляет собой реальное количество зарегистрированных сигналов от частиц, то измеряемой величине $N_{2,1}$ соответствует число эквивалентных частиц (см. выражения (5)). В большинстве случаев $N_{2,1} < N_0$.

Величины $E^\Sigma(i)$ и $E^\Sigma(i^2)$ могут быть измерены по обратным сигналам от отдельных частиц. Ненормализованные моменты для полидисперсных частиц можно измерить с помощью 2d- и 3d-экранов, созданных по изображениям частиц. Поперечные искажения пучка, пересекающего 2d-экран, на котором сечениям частиц соответствуют прозрачные участки, а фону — непрозрачный участок, зависят от ненормализованных моментов первого и второго порядков для сечений частиц (Арумов и др., 2014). Для 2d-экранов первичной величиной выступает эквивалентное сечение отверстий, так как именно поперечным размером этого отверстия определяется искажение зондирующего пучка.

Пропускание для созданных по этим сечениям 3d-экранов пропорционально ненормализованным моментам высших порядков (Арумов, Бухарин, 2018). Экран 3d представляет собой брусок с цилиндрическими отверстиями, созданными по изображениям частиц. Отметим предельный случай, когда сечения несферических частиц представляют собой изогнутые линии и полосы. В пределе одна такая полоса с пересечениями является моделью рассеивающей частицы. В этом случае можно определить эквивалентное сечение частиц с помощью 2d-экрана, затем это сечение использовать для определения концентрации эквивалентных частиц по пропусканию. Метод с использованием 3d-экранов применим для измерения ненормализованных моментов для несферических частиц в упомянутых выше предельных слу-

чаях. Для 3d-экранов задачи по определению количества и эквивалентного сечения частиц являются независимыми.

Предложенный подход характеризуется малым вкладом мелкодисперсных фракций для восстановления эквивалентной среды. Это делает перспективным использование рассматриваемого подхода для задач зондирования приземного слоя атмосферы, так как для указанного слоя максимальный вклад в обратный сигнал даёт аэрозольная компонента.

Применение концентрации частиц для микрофизической интерпретации базовых коэффициентов

Рассмотрим задачу микрофизической интерпретации базовых величин микроструктуры эквивалентного рассеивающего слоя. Будем предполагать наличие калибровки сигнала обратного рассеяния методом проводящей сферы. Эквивалентная среда состоит из монодисперсных частиц и имеет такие же базовые коэффициенты (КОР, КЭ и поперечное искажение пучка как исследуемая среда). Пусть для некоторого слоя измерены КОР и КЭ. Концентрацию эквивалентных частиц можно найти по измерениям на отдельных частицах. Для этого используются нефелометры. Предположим, что сигнал (интенсивность) обратного рассеяния на m -й частице составляет величину $i_m(\pi)$. Тогда эквивалентное значение концентрации указанных частиц n_{eq} определяется из ненормализованных моментов первого и второго порядков для обратных сигналов $i_m(\pi)$ от отдельных частиц как:

$$n_{eq}(\pi) = n_{1,2} = \frac{\left(\sum_{m=1}^N i_m(\pi) \right)^2}{V \left(\sum_{m=1}^N i_m^2(\pi) \right)}, \quad n = \frac{N}{V}. \quad (6)$$

Здесь $n_{eq}(\pi)$ — концентрация эквивалентных частиц; n — концентрация частиц; N — число частиц в объёме V . В выражении (6) отсутствуют калибровочные коэффициенты, так как вместо входящих в уравнение (6) величин интенсивности рассеянного назад излучения $i_m(\pi)$ на m -й частице могут быть использованы относительные величины, например амплитуды импульсов тока или напряжения, которым соответствует $i_m(\pi)$. Отметим, что для монодисперсных сферических частиц $n_{eq}(\pi) = n$, для полидисперсных и несферических частиц, как правило, $n_{eq}(\pi) < n$.

Измерение n_{eq} для однородной среды, состоящей из монодисперсного и полидисперсного аэрозоля, по рассеянию назад на отдельных частицах позволяет дать прямую связь между КОР и концентрацией эквивалентных частиц. Аэрозольную компоненту коэффициента обратного рассеяния β_a можно выразить через параметры эквивалентной среды следующим выражением:

$$\beta_a = n_{eq} \frac{d\sigma_{eq}(\pi)}{d\Omega}, \quad \text{отсюда} \quad \frac{d\sigma_{eq}(\pi)}{d\Omega} = \frac{\beta_a}{n_{eq}}. \quad (7)$$

Здесь n_{eq} — концентрация частиц с дифференциальным сечением обратного рассеяния $d\sigma_{eq}(\pi)/d\Omega$. Для измерения рассеяния света на отдельных частицах используются нефелометры.

В выражении (7) β_a и n_{eq} — измеряемые величины. Калибровка коаксиальной схемы с помощью проводящей сферы (см. выражение (1)) даёт возможность измерять коэффициент обратного рассеяния β_a в заданной точке зондируемой трассы с рассматриваемой ОС. Контактные измерения на отдельных частицах для указанной точки (см. выражение (6)) позволяют определять концентрацию n_{eq} эквивалентных частиц. Это даёт возможность найти дифференциальное сечение рассеяния назад на отдельной эквивалентной частице.

Найденное дифференциальное сечение обратного рассеяния на отдельной эквивалентной частице позволяет описать микроструктуру слоя через дифференциальное сечение обратного рассеяния на отдельной эквивалентной частице. В этом случае измеряемой по КОР величиной становится концентрация эквивалентных частиц.

Обсуждение результатов

Коаксиальная схема зондирования, в которой поле зрения совпадает с угловым размером зондирующего пучка, считается оптимальной в задаче калибровки сигнала обратного рассеяния с целью измерения КОР. Это связано с тем, что геометрический форм-фактор передающего и приёмного каналов постоянен вдоль всей зондируемой дистанции. Из принципа обратимости лучей следует, что для такой схемы в поле зрения приёмного канала находится четверть мощности лазерного импульса. Поле зрения приёмного канала и зондирующего пучка могут быть измерены с помощью стандартных экранов с модуляцией коэффициента пропускания. В импульсном режиме это позволяет измерить зондируемый объём среды на заданной точке трассы. Приведенные характеристики делают возможным использование отражающих сфер для калибровки лидара обратного рассеяния. Указанная схема может быть реализована в миниатюрном варианте с предельно малой средней мощностью зондирующего пучка. Сигнал обратного рассеяния для этой схемы сосредоточен на расстояниях до нескольких сотен метров. Указанные характеристики делают эту схему перспективной в задаче создания миниатюрного лидара для зондирования приземного слоя атмосферы. Для микрофизической интерпретации обратного сигнала может быть применена модель зондируемой среды как эквивалентной. Эквивалентная среда однозначно связана с исследуемой средой и состоит из монодисперсных частиц. Посредством контактных измерений обратного рассеяния на отдельных частицах с помощью ненормализованных моментов можно определить концентрацию эквивалентных частиц. Для этого достаточно использовать относительные измерения обратных сигналов на отдельных частицах. Концентрация эквивалентных частиц, как правило, меньше концентрации частиц, составляющих рассеивающий объект. Это связано с наличием функции распределения частиц по поперечным сечениям. Для несферических частиц концентрация эквивалентных частиц зависит от ориентации плоскости сечения частиц по отношению к линии зондирования. Для монодисперсных сферических частиц концентрация эквивалентных частиц равна концентрации наблюдаемых частиц. Для рассматриваемой оптимальной коаксиальной схемы измеряемые КОР и эквивалентная концентрация позволяют определить дифференциальное сечение рассеяния назад для отдельной эквивалентной частицы для исследуемого слоя. Таким образом, характеристики рассматриваемой оптимальной схемы открывают новые возможности для калибровки сигнала обратного рассеяния в задаче измерения КОР. Дополнение контактными измерениями позволяет проводить микрофизическую интерпретацию КОР через микроструктуру эквивалентной среды. Представленный сценарий измерений может использоваться для исследования рассеивающих объектов, состоящих из полидисперсных и несферических частиц. Отметим предельные случаи, когда сечение рассеивающей частицы представляет собой пересекающиеся линии (волокна, нити, полосы и т.д.). Использование модели эквивалентной среды может быть применимо и в этих случаях. Представленный метод с использованием эквивалентной среды имеет наглядную и обоснованную последовательность этапов для интерпретации данных лидарного зондирования приземного слоя атмосферы и может быть расширен для случаев, когда рассеивающий объект состоит из частиц с различными оптическими и физическими свойствами.

Выводы

Для лидара упругого рассеяния с оптимальной коаксиальной схемой с помощью отражающей сферы можно произвести калибровку обратного сигнала для измерения коэффициента обратного рассеяния. Для микрофизической интерпретации указанного коэффициента пред-

ставлен способ определения концентрации эквивалентных частиц внутри слоя по измерениям сигналов обратного рассеяния на отдельных частицах. С использованием измеренного лидаром коэффициента обратного рассеяния в некоторой точке трассы и контактных измерений концентрации эквивалентных частиц можно найти дифференциальное сечение рассеяния на отдельной эквивалентной частице. Это сечение позволяет сопоставить сигналу обратного рассеяния концентрацию эквивалентных частиц. Предложенный способ дистанционного измерения концентрации эквивалентных частиц имеет перспективы применения в задачах лидарного зондирования приземных трасс, содержащих полидисперсные и несферические частицы. Это даёт возможность проводить интерпретацию коэффициентов обратного рассеяния и экстинкции через параметры эквивалентной среды. Представленный метод дистанционного определения концентрации частиц в перспективе может быть применён для зондирования приземного слоя атмосферы миниатюрными лидарами упругого рассеяния с предельно низким уровнем мощности зондирующего излучения в импульсе.

Работа выполнена в рамках программы «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8.

Литература

1. Арумов Г. П., Бухарин А. В. Трёхмерные экраны для измерения ненормализованных моментов // Измерительная техника. 2018. № 9. С. 44–48. DOI: 10.32446/0368-1025it-2018-9-44-48.
2. Арумов Г. П., Бухарин А. В., Тюрин А. В. Использование статистически неоднородных экранов в задаче калибровки лидара по параметрам изображений частиц для приземного слоя атмосферы // Измерительная техника. 2014. № 3. С. 36–40.
3. Арумов Г. П., Бухарин А. В., Макаров В. С. Трёхмерные отражающие объекты в задаче моделирования лидарного сигнала от рассеивающего слоя // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 328–334. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-328-334.
4. Бухарин А. В., Арумов Г. П., Блех Ю. М., Макаров В. С., Тюрин А. В. Модуляция излучения диодного лазера для формирования обратного сигнала, не зависящего от расстояния // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 10. С. 877–882.
5. Izhovkina N. I., Artekha S. N., Erokhin N. S., Mikhailovskaya L. A. Aerosol, plasma vortices and atmospheric processes // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2018. V. 54. No. 11. P. 1513–1524. DOI: 10.1134/S0001433818110038.
6. Kavaya M. J., Menzies R. T. Lidar aerosol backscatter measurements: systematic, modeling, and calibration error considerations // Applied Optics. 1985. V. 24. No. 21. P. 3444–3453. <https://doi.org/10.1364/AO.24.003444>.
7. Measures R. M. Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications. N. Y.: Wiley, 1984. 912 p.
8. Veselovskii 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. V. 41. No. 18. P. 3685–3699. <https://doi.org/10.1364/AO.41.003685>.

Some problems of basic lidar coefficients interpretation

G. P. Arumov, A. V. Bukharin

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: tumbul@iki.rssi.ru

The capabilities of a miniature elastic scattering lidar with an optimal coaxial sounding scheme are analyzed. In such a scheme, the geometric form factor is constant along the entire route. To simulate the shape of a lidar signal from a homogeneous atmosphere without attenuation (hardware function) on paths with a fixed range, standard screens with transmittance modulation can be used. Unlike conventional lidars, backscattering coefficient measurements can be calibrated either using standard scattering

surfaces with a known backscattering angular pattern or using reflective spheres. The interpretation of the microphysical parameters of the scattering layer is based on the use of the model of an equivalent layer consisting of monodisperse particles. The microstructure of the equivalent layer is determined from measurements of backscattering signals on the particles of the scattering medium using unnormalized first and second order moments. The application of the differential cross section for backscattering by an individual particle to measure the concentration of equivalent particles by the backscattering coefficient is substantiated. The proposed method is relevant in the problems of remote sensing of surface paths by lidars with an extremely low energy per pulse, followed by a microphysical interpretation of the base coefficients.

Keywords: coaxial scheme, optimal scheme, backscatter coefficient, calibration, equivalent cross section, unnormalized moment, equivalent medium, concentration, remote sensing, conducting sphere, perforated screen, scattering layer, geometric form factor, elastic scattering lidar

Accepted: 05.12.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-283-290

References

1. Arumov G. P., Bukharin A. V., Three-Dimensional Screens for Measuring Non-normalized Moments, *Measurement Techniques*, 2018, Vol. 61, No. 9, pp. 908–913, DOI: 10.1007/s11018-018-1523-1.
2. Arumov G. P., Bukharin A. V., Tyurin A. V., Use of Statistically Inhomogeneous Screens in Calibration of Lidar from the Parameters of Images of Particles for the Bottom Layer of the Atmosphere, *Measurement Techniques*, 2014, Vol. 57, No. 3, pp. 287–293, <https://doi.org/10.1007/s11018-014-0447-7>.
3. Arumov G. P., Bukharin A. V., Makarov V. S., Three-dimensional reflecting objects in the problem of modeling a lidar signal from a scattering layer, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 4, pp. 328–334 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-328-334.
4. Bukharin A. V., Arumov G. P., Blikh Yu. M., Makarov V. S., Turin A. V., Modulation of diode laser radiation for the formation of a distance-independent backscattered signal, *Quantum Electronics*, 2016, Vol. 46, No. 10, pp. 877–882, DOI: 10.1070/QEL16009.
5. Izhovkina N. I., Artekha S. N., Erokhin N. S., Mikhailovskaya L. A., Aerosol, plasma vortices and atmospheric processes, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, Vol. 54, No. 11, pp. 1513–1524, DOI: 10.1134/S0001433818110038.
6. Kavaya M. J., Menzies R. T., Lidar aerosol backscatter measurements: systematic, modeling, and calibration error considerations, *Applied Optics*, 1985, Vol. 24, No. 21, pp. 3444–3453, <https://doi.org/10.1354/AO.24.033444>.
7. Measures R. M., *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*, New York: Wiley, 1984, 912 p.
8. Veselovskii 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, No. 18, pp. 3685–3699, <https://doi.org/10.1364/AO.41.003685>.