

# Сравнение двухпозиционных лидарных систем в задаче интерпретации сигнала обратного рассеяния

Г. П. Арумов, А. В. Бухарин

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

Рассмотрены лидары упругого рассеяния, которые включают в себя коаксиальную схему зондирования и дополнительный приёмный канал. В оптимальной схеме угловые размеры пучка и поля зрения приёмных каналов практически одинаковы. Для таких схем геометрический форм-фактор дополнительного и основного приёмных каналов может быть измерен с помощью стандартных перфорированных экранов с монодисперсными отверстиями. Указанные экраны могут применяться для моделирования формы сигнала обратного рассеяния из однородной атмосферы без ослабления (аппаратной функции) на трассах с фиксированной дальностью. Показано, что калибровка оптимальной схемы для измерения коэффициента обратного рассеяния может проводиться 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. Индикатором эквивалентного сечения частиц внутри слоя служит угловой размер ореола вокруг пучка. Угловой размер пучка можно измерить с помощью стандартных перфорированных экранов. Угловой размер прошедшего через такой экран пучка увеличивается на заданную величину. Дистанционные измерения микроструктуры эквивалентного слоя с помощью лидаров могут быть дополнены контактными методами регистрации сигналов обратного и прямого рассеяния на отдельных частицах рассеивающей среды. Описанная методика позволяет определять концентрацию эквивалентных частиц по сигналу обратного рассеяния.

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

Одобрена к печати: 21.02.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-41-48

## Введение

В настоящее время для дистанционного зондирования высотных слоёв атмосферы и измерения микрофизических величин (размеры аэрозолей, показатель преломления и поглощения) применяются лидары на нескольких длинах волн (Veselovskii et al., 2002; Yan et al., 2019). Набор измеряемых величин для зондируемого слоя определяется базовыми коэффициентами (коэффициент обратного рассеяния и экстинкции). Определение микрофизических величин рассеивающей среды из базовых коэффициентов основано на применении методов решения обратной задачи. Обратная задача формулируется в виде интегральных уравнений Фредгольма первого рода, связывающих коэффициенты обратного рассеяния и экстинкции с функцией распределения частиц по размерам (Veselovskii et al., 2015). Ядра интегральных уравнений вычисляются на основе теории Ми. Для этого делают ряд допущений о сферической форме частиц, виде функции распределения частиц по размерам, а также о диапазоне для действительной и мнимой части коэффициента преломления. В общем случае набора базовых коэффициентов рассеяния недостаточно для определения функции распределения частиц по размерам, а также мнимой и действительной части коэффициента преломления. Решению обратной задачи соответствует пространство решений, из которого выбирают наиболее вероятное по минимуму невязки (Chemuyakin et al., 2016).

Измеряемые лидаром на нескольких длинах волн базовые коэффициенты зависят как от размеров, так и от концентрации частиц внутри рассеивающего слоя (Measures, 1983).

Особенность методов, основанных на использовании спектральной зависимости базовых коэффициентов, — отсутствие параметров, непосредственно связанных с размером частиц. Отношение коэффициента обратного рассеяния (КОР) к коэффициенту экстинкции не может быть выбрано в качестве индикатора размера частиц, поскольку его зависимость от размеров частиц не является однозначной.

Сигналы обратного рассеяния на нескольких длинах волн используются для моделирования микроструктуры рассеивающего слоя. Однако из-за наличия интерференционных эффектов внутри частицы зависимость сигнала обратного рассеяния от размера частиц характеризуется нерегулярными осцилляциями с достаточно большой амплитудой.

Для ограничения диапазона решений обратной задачи требуется априорная информация о физических и оптических свойствах частиц. Если частицы внутри рассеивающего объекта несферические, то даже при наличии априорной информации практически невозможно из базовых коэффициентов смоделировать микрофизические свойства частиц, за исключением случаев, представляющих лишь теоретический интерес (Mishchenko, 2009).

Для исследования приземных слоёв атмосферы предпочтительными становятся лидары с минимальными размерами и энергопотреблением. Лидары такого типа с низкой мощностью зондирующего импульса были предложены для зондирования атмосферы Марса (Arumov et al., 1999; Pershin et al., 1991). В таких лидарах используются диодные лазеры с низкой мощностью зондирующего импульса. Сигнал обратного рассеяния сосредоточен на расстоянии 150–200 м.

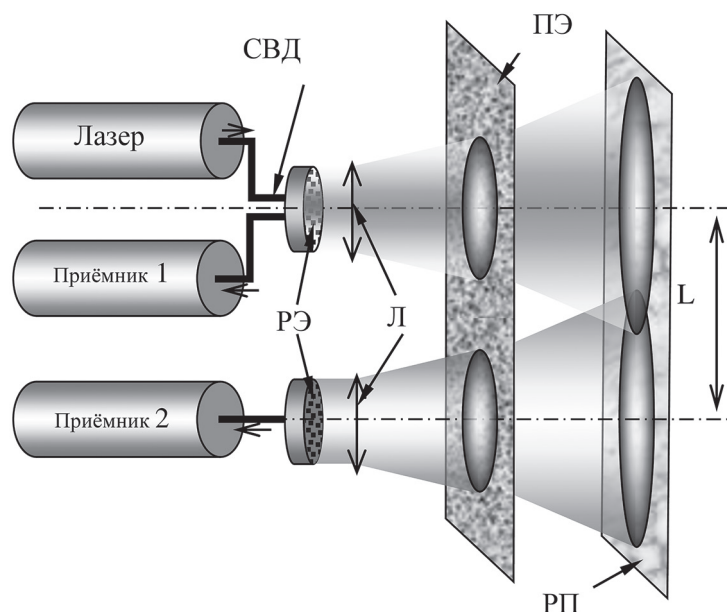
Нижний слой атмосферы характеризуется большим разнообразием частиц по оптическим и физическим свойствам. Энергия лазерного импульса для дистанционных измерений характеристик этого слоя должна быть достаточно малой (безопасной для глаз), особенно при зондировании горизонтальных трасс. Для восстановления микроструктуры данного слоя методы решения некорректной обратной задачи неприменимы. В связи с этим следует использовать наиболее простые модели для интерпретации микрофизических характеристик таких объектов по данным лидарного зондирования.

## Оптимальная двухпозиционная схема лидара обратного рассеяния

Для задач дистанционного зондирования приземных слоёв атмосферы преимущественно обладают оптимальные схемы зондирования. В оптимальных схемах поле зрения (ПЗ) и угловые размеры пучка (УРП) равны или совпадают. В такой конфигурации аппаратная функция лидара имеет наиболее простой вид (под аппаратной функцией подразумевается форма лидарного сигнала обратного рассеяния из однородной атмосферы с пренебрежимо малым коэффициентом ослабления). Такая особенность позволяет реализовать различные режимы зондирования с применением модуляции излучения передающего канала (Bukharin et al., 2016). Пример оптимальной конфигурации двухпозиционной схемы (ДПС) зондирования изображён на *рисунке* (см. с. 43). Верхняя часть представляет собой коаксиальную схему зондирования. Для этой схемы точечный источник и приёмник расположены в одной точке плоскости наблюдения. Оптические оси приёмного канала и зондирующего пучка совпадают, а угловые размеры поля зрения и зондирующего пучка равны, так как формируются одной линзой. Дополнительный приёмный канал расположен ниже основного и имеет такие же диаметр входной апертуры и поле зрения, как и основной приёмный канал. Оптическая ось дополнительного канала смещена относительно основного на некоторое расстояние  $L$ .

Коаксиальная схема зондирования с равными угловыми размерами пучка и поля зрения создаётся посредством использования световолоконного делителя (СВД). Делитель представляет собой соединение типа Y. В качестве него можно использовать многомодовые световоды 50/125 мкм.

Излучение лазера проходит через верхний полюс делителя СВД, нижний полюс делителя предназначен для регистрации детектором отражённого излучения. В качестве излучателя можно использовать лазер Axcel Photonics 808 нм 50 мкм. Мощность — до 1 Вт.



Оптимальная двухпозиционная схема зондирования: СВД — световолоконный делитель; РЭ — рассеивающий элемент; ПЭ — перфорированный экран; Л — линза; РП — рассеивающая поверхность

Излучение на выходе делителя попадает на рассеивающий элемент (РЭ). Использование этого элемента не является необходимым, однако он может сформировать выходное излучение и поля зрения с заданным коническим углом. Этот угол определяется фокусным расстоянием линз Л и диаметром рассеивающего элемента РЭ.

В качестве детектора можно использовать продукцию фирм Thorlabs, ID Quantique (IDQ), Laser Components. Для фирмы Laser Components характерны более высокая квантовая эффективность для длины волны 808 нм (70 %), однако для большинства указанных детекторов типично высокое значение времени восстановления — до 20 мкс.

Для приёмников фирмы Thorlabs характерны следующие параметры: собственный шум приёмника — до 150 Гц, активная область детектора имеет диаметр 50 мкм. Квантовая эффективность в диапазоне от 800 до 900 нм составляет от 7 % (800 нм) до 3 % (900 нм). Такие характеристики лазеров и приёмников позволяют создать коаксиальную схему зондирования с одинаковыми угловыми размерами поля зрения и зондирующего пучка.

ДПС на *рисунке* позволяет измерять расстояние по времени задержки между стартовым импульсом лазера и обратным сигналом и по перекрытиям полей зрения приёмных каналов с зондирующим пучком. Указанное перекрытие измеряется по отношению обратного сигнала от дополнительного и основного приёмных каналов. Зависимость отношения двух обратных сигналов от расстояния пропорциональна трассовой зависимости геометрического фактора дополнительного и основного приёмных каналов и выступает одним из видов калибровки ДПС.

Основным преимуществом схем на *рисунке* становится возможность применения экранов, формирующих заданное увеличение поля зрения и углового размера пучка. Одним из таких экранов видится перфорированный экран (ПЭ). Этот экран представляет собой непрозрачный тонкий лист с нанесёнными на него отверстиями. Установка ПЭ перед приёмными и передающими каналами позволяет вносить заданные искажения для зондирующего пучка и поля зрения приёмных каналов. Это искажение можно измерить по изменению перекрытий поля зрения с зондирующим пучком. Для схемы на *рисунке* зависимость отношения двух сигналов от расстояния можно измерить на трассе с фиксированной дальностью, с топографическим объектом на конце, используя набор ПЭ с различными отверстиями. Таким образом, ДПС на *рисунке* позволяет измерять угловую трансформацию пучка в рассеивающей среде по изменениям отношения обратного сигнала для двух приёмных каналов. Угловой

трансформации пучка и полей зрения можно сопоставить рассеивающую среду с монодисперсными частицами. Поперечное сечение этих частиц мы определяем как эквивалентное сечение. Если известно эквивалентное сечение и пропускание, то появляется возможность измерять концентрацию эквивалентных частиц в рассеивающем слое.

Геометрический форм-фактор (ГФФ) приёмного и передающего каналов для коаксиальной схемы на *рисунке* равен 0,25. Это следует из принципа обратимости лучей. Для обычных коаксиальных зондирующих систем поле зрения практически всегда существенно больше угловых размеров пучка, что соответствует  $ГФФ = 1$  вдоль всей зондируемой трассы. В связи с этим представляет интерес анализ оптимальной и обычной двухпозиционных схем. Сравнение указанных зондирующих систем с ДПС представлено в *табл. 1*.

Таблица 1. Измерение ГФФ и аппаратной функции лидарами с ДПС

Оптимальная ДПС	Обычная ДПС
Для основного канала $ГФФ = 0,25$	Для основного канала $ГФФ = 1$
По изменению ГФФ можно определять угловое увеличение ПЗ и УРП	По изменению ГФФ можно делать только качественные выводы об угловой трансформации пучка в рассеивающей среде
Максимальное значение отношения сигнал/фон (угловые размеры пучка и поля зрения одинаковы)	Значение отношения сигнал/фон включает в себя отношение угловых размеров пучка и поля зрения приёмного канала
Аппаратная функция измеряется посредством ПЭ на трассах с фиксированной дальностью	Аппаратная функция не может быть измерена с помощью ПЭ

Таким образом, для ДПС с оптимальной схемой технические характеристики могут быть измерены посредством ПЭ. Это связано с возможностью моделирования поперечных размеров пучка и поля зрения на любом расстоянии с помощью ПЭ по отношению обратных сигналов. Это отношение зависит от поперечных искажений пучка и поля зрения в рассеивающей среде. Для оптимальных ДПС увеличение измеряемой по отношению сигналов дистанции позволяет определить угловую трансформацию пучка. Угловой размер пучка на заданном расстоянии до рассеивающего слоя позволяет определить величину зондируемого (облучаемого) объёма для заданного слоя из лидарного сигнала для коаксиального канала.

Для измерения базовых коэффициентов необходима калибровка лидара. И в этом случае оптимальная ДПС имеет преимущества по сравнению с обычной ДПС.

### Сравнение способов калибровки лидара обратного рассеяния

Часто упоминаемый способ калибровки обычных лидаров упругого рассеяния основан на использовании поверхностей с заданными угловыми диаграммами рассеяния. В качестве стандартных рассеивающих объектов применяются поверхности, угловая зависимость обратного рассеяния для которых соответствует закону Ламберта. Однако в экспериментах по калибровке часто наблюдаются отклонения от данного закона. В этой связи следует сравнить способы калибровки для оптимальной и обычной ДПС в задаче измерения КОР в виде *табл. 2*.

Следует отметить, что калибровка с помощью стандартных рассеивающих поверхностей применима для любых ДПС. Калибровка с использованием отражающих сфер применима только для оптимальных ДПС. Величина зондируемого коаксиальным каналом объёма внутри зондируемого слоя, а также сигнал обратного рассеяния от отражающей сферы позволяют сопоставить обратному сигналу от слоя коэффициент обратного рассеяния.

Применение отражающих 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  $10^{-7} \text{ м}^{-1} \cdot \text{стр}^{-1}$  (Measures, 1983). Эту величину можно смоделировать

находящейся в единице объёма отражающей сферой диаметром  $1,3 \cdot 10^{-3}$  м. Сфере диаметром 2 см соответствует КОР на уровне  $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1} \cdot \text{стр}^{-1}$ . Изготовление отражающих (проводящих) сфер не представляет значительных технических трудностей. Для рассматриваемой оптимальной коаксиальной схемы зондирования достаточно получить сигнал от сферы в одной точке для полной калибровки вдоль всей трассы. Кроме того, применение отражающих сфер делает возможной интерпретацию обратного сигнала через дифференциальное сечение обратного рассеяния для отражающей сферы в единице объёма зондирующего объекта.

Таблица 2. Сравнение способов калибровки лидаров с ДПС

Калибровка ДПС	Калибровка оптимальных ДПС
Существенная зависимость от угловой диаграммы обратного рассеяния. Трудности учёта отклонений от стандартных угловых диаграмм рассеяния (например, Ламбертовой)	Коэффициент отражения от сферы с радиусом $R$ равен $R^2/4$
Не зависит от геометрического форм-фактора приёмного и передающего каналов	Существенная зависимость от ГФФ. Но для коаксиальной схемы на <i>рисунке</i> ГФФ = 0,25, а для отражающей сферы ГФФ = 1
Использование аттенуаторов для измерения обратного сигнала от рассеивающей поверхности (обратный сигнал из атмосферы на несколько порядков меньше обратного сигнала от рассеивающей поверхности)	Использование сфер позволяет детектировать обратный сигнал, сравнимый по величине с сигналом обратного рассеяния из атмосферы

### Сравнение способов интерпретации микроструктуры рассеивающего слоя

Перфорированный экран может быть получен по снимкам рассеивающих частиц. Для таких экранов прозрачные отверстия соответствуют поперечному сечению частиц. Полидисперсным частицам соответствуют круглые отверстия с радиусами, распределёнными по логнормальному распределению. Этим частицам можно поставить в соответствие экран с монодисперсными отверстиями. Оба этих экрана имеют одинаковые индикаторы размера частиц в виде углового размера ореола вокруг пучка, проходящего через перфорированный экран. Тогда поперечным сечениям отверстий экрана с монодисперсными отверстиями можно сопоставить эквивалентное сечение (Арумов и др., 2022). Как указано ранее, эквивалентное сечение определяется отношением моментов второго и первого порядков для сечений частиц исследуемого экрана. Такой подход применим для несферических частиц. Сечениям несферических частиц соответствуют отверстия разной формы и размеров. Следует отметить предельные случаи, когда сечения образованы неоднородностями в виде переплетающихся полос и нитей. Таким экранам можно сопоставить поперечные сечения только по угловому размеру ореола при рассеянии вперёд.

Проведём сравнение среднего и эквивалентного сечения частиц для характеристики рассеивающего объекта.

Из *табл. 3* следует, что среднее сечение частицы может быть найдено только с помощью микрофизических измерений на отдельных частицах. Эквивалентное сечение можно определить по угловой трансформации пучка в рассеивающей среде.

Сигнал обратного рассеяния может использоваться для относительных измерений концентрации частиц в рассеивающем слое (Pershin et al., 2020). Использование ненормализованных моментов позволяет находить концентрацию частиц по отношению квадрата ненормализованного момента первого порядка к ненормализованному моменту второго порядка. Это расширяет возможности по восстановлению микроструктуры эквивалентной среды как контактными, так и дистанционными методами. Например, измерения на отдельных частицах в направлении вперёд и назад позволяют определить микроструктуру исследуемой среды

по данным, характерным для лидара упругого рассеяния. Основным измеряемым параметром выступает КОР. Значение этого коэффициента зависит от альbedo однократного рассеяния. Рассеяние в прямом направлении практически не зависит от альbedo. Это позволяет посредством контактных измерений определять концентрацию эквивалентных частиц по прямому рассеянию. Затем значению КОР можно сопоставить указанную концентрацию. В такой методике существует однозначная связь между концентрацией и поперечным сечением эквивалентных частиц (Арумов, Бухарин, 2022). При известном коэффициенте пропускания и концентрации эквивалентных частиц в слое определяется эквивалентное сечение частиц. И наоборот, при известном пропускании и эквивалентном сечении определяется концентрация эквивалентных частиц.

Таблица 3. Сравнение среднего и эквивалентного значений поперечного сечения

Среднее сечение	Эквивалентное сечение
Среднее значение сечения зависит от нормировки. Ограниченная применимость к несферическим частицам (для сечений в виде изогнутых полос и нитей метод нормировки неприменим)	Эквивалентное сечение зависит только от ненормализованных моментов второго и первого порядков (может применяться, когда нормировки не существует). Применимо для предельных случаев несферических частиц (переплетающиеся нити, полосы, изогнутые линии и т. д.)
Может быть получено только в результате обработки микрофизических величин (снимки, отбор проб и т. д.)	Может быть измерено по угловой трансформации пучка в рассеивающей среде (угловой размер ореола вокруг пучка) 2d- и 3d-экранами. При распространении пучка в рассеивающей среде индикатором размера частиц может стать угловой размер ореола при прямом рассеянии
Высокая чувствительность к мелкодисперсным фракциям	Максимальная чувствительность к крупнодисперсным фракциям

## Заключение

Применение концепции эквивалентной среды позволяет использовать максимально упрощённый метод для микрофизической интерпретации базовых коэффициентов для лидара упругого рассеяния. Рассмотрена оптимальная двухпозиционная схема, включающая коаксиальный приёмопередающий канал и дополнительный приёмный канал. Угловые размеры зондирующего пучка и поля зрения приёмных каналов совпадают. Для такой схемы существуют способы определения аппаратной функции для коаксиального канала и трассовой зависимости геометрического форм-фактора основного и дополнительного приёмных каналов посредством перфорированного экрана на трассах с фиксированной дальностью. Для измерения коэффициента обратного рассеяния коаксиальный канал может быть откалиброван посредством отражающих сфер (Арумов, Макаров, 2022). Для интерпретации указанного коэффициента обоснованы схемы контактных измерений на отдельных частицах, характерные для лидарных измерений, что позволяет применять коэффициент обратного рассеяния для определения концентрации эквивалентных частиц. Для этого планируются совместные измерения с применением лидара обратного рассеяния и нефелометра.

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

## Литература

1. Арумов Г. П., Бухарин А. В. Сочетание локальных и лидарных методов в задаче определения микрофизических свойств рассеивающей среды // Тр. МФТИ. 2022. Т. 14. № 4. С. 133–143.
2. 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.

3. *Arumov G. P., Bukharin A. V., Linkin V. M., Lipatov A. N., Lyash A. N., Makarov V. S., Pershin S. M., Tiurin A. V.* Compact aerosol lidar for Martian atmosphere monitoring according to the NASA Mars Surveyor Program'98 // Proc. 6<sup>th</sup> Intern. Conf. Industrial Lasers and Laser Applications'98. 27–29 June 1998, Shatura, Moscow Region. 1999. V. 3688. 7 p. <https://doi.org/10.1117/12.337558>.
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. V. 46. No. 10. P. 877–882. DOI: 10.1070/QEL16009.
5. *Chemyakin E., Burton S., Kolgotin A., Müller D., Hostetler C., Ferrare R.* Retrieval of aerosol parameters from multiwavelength lidar: investigation of the underlying inverse mathematical problem // Applied Optics. 2016. V. 55. Iss. 9. P. 2188–2202. <https://doi.org/10.1364/AO.55.002188>.
6. *Measures R. M.* Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 1983. 912 p.
7. *Mishchenko M. I.* Electromagnetic scattering by nonspherical particles: A tutorial review // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2009. V. 110. No. 11. P. 808–832. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2008.12.005>.
8. *Pershin S., Linkin V., Makarov V., Prochazka I., Hamal K.* Spaceborn laser altimeter based on the single photon diode receiver and semiconductor laser transmitter // Conf. Lasers and Electro-Optics (GLEO). 12–17 May 1991, Baltimore, Maryland. 1991. Art. No. CFI1.
9. *Pershin S. M., Sobisevich A. L., Grishin M. Ya., Gravurov V. V., Zavozin V. A., Kuzminov V. V., Lednev V. N., Likhodeev D. V., Makarov V. S., Myasnikov A. V., Fedorov A. N.* Volcanic activity monitoring by unique LIDAR based on a diode laser // Laser Physics Letters. 2020. V. 17. No. 11. P. 115607–115613. DOI: 10.1088/1612-202X/abbedc.
10. *Veselovskii I., Kolgotin A., Griaznov V., Müller 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>.
11. *Veselovskii I., Whiteman D. N., Korenskiy M., Suvorina A., Perez-Ramirez D.* Use of rotational Raman measurements in multiwavelength aerosol lidar for evaluation of particle backscattering and extinction // Atmospheric Measurement Techniques. 2015. V. 8. P. 4111–4122. <https://doi.org/10.5194/amt-8-4111-2015>.
12. *Yan D., Di H., Zhao J., Wen X., Wang Y., Song Y., Hua D.* Improved algorithm of aerosol particle size distribution based on remote sensing data // Applied Optics. 2019. V. 58. P. 8075–8082. <https://doi.org/10.1364/AO.58.008075>.

## Comparison of two-position lidar systems in the problem of backscatter signal interpretation

**G. P. Arumov, A. V. Bukharin**

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

Elastic scattering lidars are considered, which include a coaxial sounding scheme and an additional receiving channel. In the optimal scheme, the angular dimensions of the probing beam and the fields of view of the receiving channels practically coincide. For such schemes, the geometric form factor of the additional and main receiving channels can be measured using standard perforated screens with monodisperse holes. These screens can be used to simulate a homogeneous atmosphere backscatter signal without attenuation (response function) on fixed range paths. It is shown that the calibration of the optimal scheme for measuring the backscattering coefficient can be carried out both using standard scattering surfaces with a known backscattering angular pattern, and using reflecting spheres. The interpretation of the microphysical parameters of the scattering layer is based on the use of an equivalent layer model consisting of monodisperse particles. An indicator of the equivalent cross section of particles inside the layer is the angular size of the halo around the beam. The angular size of the beam can be measured using standard perforated screens. The angular size of the beam passing through such a screen increases by a given value. Remote measurements of the microstructure of the equivalent layer using lidars can be supplemented by contact methods for detecting back and forward scattering signals

from individual particles of the scattering medium. The described technique makes it possible to determine the concentration of equivalent particles from the backscatter signal.

**Keywords:** coaxial circuit, optimal circuit, backscatter coefficient, lidar calibration, equivalent cross section, non-normalized moment, equivalent medium, concentration, remote sensing, reflecting sphere, perforated screen, scattering layer, geometric form factor, elastic scattering lidar

Accepted: 21.02.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-41-48

## References

1. Arumov G. P., Bukharin A. V., Combination of local and lidar methods in the problem of determining the microphysical properties of a scattering medium, *Trudy MFTI*, 2022, Vol. 14, No. 4, pp. 133–143 (in Russian).
2. 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.
3. Arumov G. P., Bukharin A. V., Linkin V. M., Lipatov A. N., Lyash A. N., Makarov V. S., Pershin S. M., Tiurin A. V., Compact aerosol lidar for Martian atmosphere monitoring according to the NASA Mars Surveyor Program'98, *Proc. 6<sup>th</sup> Intern. Conf. Industrial Lasers and Laser Applications'98*, 7–29 June, 1998, Shatura, Moscow Region, 1999, Vol. 3688, 7 p., <https://doi.org/10.1117/12.337558>.
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. Chemyakin E., Burton S., Kolgotin A., Müller D., Hostetler C., Ferrare R., Retrieval of aerosol parameters from multiwavelength lidar: investigation of the underlying inverse mathematical problem, *Applied Optics*, 2016, Vol. 55, Issue 9, pp. 2188–2202, <https://doi.org/10.1364/AO.55.002188>.
6. Measures R. M., *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*, Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 1983, 912 p.
7. Mishchenko M. I., Electromagnetic scattering by nonspherical particles: A tutorial review, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, Vol. 110, No. 11, pp. 808–832, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2008.12.005>.
8. Pershin S., Linkin V., Makarov V., Prochazka I., Hamal K., Spaceborn laser altimeter based on the single photon diode receiver and semiconductor laser transmitter, *Conf. Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 12–17 May, 1991, Baltimore, Maryland, 1991, Art. No. CF11.
9. Pershin S. M., Sobisevich A. L., Grishin M. Ya., Gravirov V. V., Zavozin V. A., Kuzminov V. V., Lednev V. N., Likhodeev D. V., Makarov V. S., Myasnikov A. V., Fedorov A. N., Volcanic activity monitoring by unique LIDAR based on a diode laser, *Laser Physics Letters*, 2020, Vol. 17, No. 11, pp. 115607–115613, DOI: 10.1088/1612-202X/abbedc.
10. Veselovskii I., Kolgotin A., Griaznov V., Müller 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>.
11. Veselovskii I., Whiteman D. N., Korenskiy M., Suvorina A., Perez-Ramirez D., Use of rotational Raman measurements in multiwavelength aerosol lidar for evaluation of particle backscattering and extinction, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, Vol. 8, pp. 4111–4122, <https://doi.org/10.5194/amt-8-4111-2015>, 2015.
12. Yan D., Di H., Zhao J., Wen X., Wang Y., Song Y., Hua D., Improved algorithm of aerosol particle size distribution based on remote sensing data, *Applied Optics*, 2019, Vol. 58, pp. 8075–8082, <https://doi.org/10.1364/AO.58.008075>.