

Научная статья

УДК 551.501.793

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-31-36>

## Выбор оптимальных трасс для дистанционных измерений микроструктуры рассеивающего объекта

Георгий Петрович Арумов<sup>1</sup>, Алексей Владимирович Бухарин<sup>2</sup>✉

<sup>1, 2</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>1</sup>arumov@iki.rssi.ru

<sup>2</sup>tumbul@iki.rssi.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3171-3105>

**Аннотация.** Актуальной задачей дистанционного мониторинга рассеивающих частиц в нижнем слое атмосферы является разработка методов получения информации о микроструктуре рассеивающего слоя по измеряемому сигналу обратного рассеяния. Рассмотрены основные параметры микроструктуры приземного слоя атмосферы (концентрация и площадь поперечных сечений частиц) и основные измеряемые величины при лидарном зондировании (коэффициент обратного рассеяния и коэффициент экстинкции). При одночастотном лидарном зондировании рассматриваемым коэффициентам можно сопоставить микроструктуру эквивалентной рассеивающей среды, состоящей из монодисперсных частиц. Это позволяет интерпретировать коэффициенты обратного рассеяния и экстинкции через микроструктуру эквивалентной среды. Величиной, непосредственно связанной с поперечным размером частиц, служит угловой размер ореола вокруг пучка, распространяющегося в рассеивающей среде. На примере двухпозиционной схемы зондирования рассмотрены способы измерения углового размера ореола вокруг пучка, прошедшего через рассеивающий экран. Рассеивающий экран представляет собой непрозрачную плоскость с отверстиями, проекциями которых являются изображения частиц. Показано, что если угловой размер прошедшего через экран пучка увеличивается в два раза, то схема измерения углового размера ореола будет оптимальной. Это можно достичь либо выбором линейного увеличения, по которому созданы изображения частиц на экране, либо перемещением экрана вдоль линии зондирования. Реализация указанных способов позволяет описать содержащиеся в приземном слое атмосферы полидисперсные и несферические частицы через сечение эквивалентных частиц. Появляется возможность применения дистанционных методов в задаче мониторинга приземного слоя атмосферы.

**Ключевые слова:** зондирование, приземный слой, рассеяние, ореол, несферические частицы, лидар

**Для цитирования:** Арумов Г. П., Бухарин А. В. Выбор оптимальных трасс для дистанционных измерений микроструктуры рассеивающего объекта // Измерительная техника. 2022. № 10. С. 31–36. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-31-36>

**Финансирование:** работа выполнена в рамках программы Российской академии наук и Министерства науки и высшего образования по теме «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8).

## Selection of the optimal traces for remote measurements of the microstructure of a scattering object produced from particle images

Georgy P. Arumov<sup>1</sup>, Alexei V. Bukharin<sup>2</sup>✉

<sup>1, 2</sup> Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>1</sup>arumov@iki.rssi.ru

<sup>2</sup>tumbul@iki.rssi.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3171-3105>

**Abstract.** An urgent problem of remote monitoring of scattering particles in the lower atmosphere is the development of methods for obtaining information about the microstructure of the scattering layer from the measured backscatter signal. The main parameters of the microstructure of the surface layer of the atmosphere include the concentration and cross-sectional of particles. In lidar sensing, the main measured quantities are the backscatter coefficient and the extinction coefficient. For single-frequency lidar sounding, these coefficients can be associated with an equivalent scattering medium consisting of monodisperse particles. This makes it possible to interpret the backscatter coefficient and extinction through the microstructure of an equivalent medium. In lidar sounding, the quantity directly related to the transverse particle size is the angular size of the halo around the beam propagating in the scattering medium. On the example of a two-position probing scheme, methods for measuring the angular size of the halo around a beam that has passed through a scattering screen are considered. The diffusing screen is an opaque plane with holes whose projections are the images of particles. It is shown that if the angular size of the beam passing through the screen is doubled, then the measurement scheme will be optimal. This can be achieved either by choosing a linear magnification, according to which the images of particles on the screen are created, or by moving the screen along the probing line. The implementation of these methods makes it possible to describe the polydisperse and non-spherical particles contained in the surface layer of the atmosphere through the cross section of equivalent particles. It becomes possible to use remote methods in the problem of monitoring the surface layer of the atmosphere.

**Keywords:** sounding, surface layer, scattering, halo, non-spherical particles, lidar

**Financial Support:** The work was carried out within the framework of the program of the Russian Academy of Sciences and the Ministry of Science and Higher Education, subject "Monitoring", state registration no. 122042500031-8.

**Введение.** В описывающее обратный сигнал лидарное уравнение упругого рассеяния входят два неизвестных коэффициента – коэффициент обратного рассеяния и коэффициент экстинкции. Коэффициент экстинкции характеризует ослабление светового пучка в рассеивающей среде. Если коэффициентом экстинкции можно пренебречь, то по обратному сигналу можно однозначно определить зависимость коэффициента обратного рассеяния от расстояния вдоль трассы. Если коэффициентом экстинкции пренебречь нельзя, то нет возможности определять зависимость коэффициента обратного рассеяния вдоль зондируемой трассы. Для решения уравнения необходима информация о соотношении между этими коэффициентами, а также о граничных условиях, например о значениях указанных коэффициентов в некоторой точке в конце трассы. Тогда появляется возможность определить зависимость каждого из указанных коэффициентов от расстояния вдоль трассы.

При решении лидарного уравнения при некоторых условиях, например в атмосфере в условиях городской или сельской местности, а также над морской поверхностью, указанное соотношение может быть известно [1], что позволяет восстановить зависимость каждого из указанных коэффициентов вдоль всей зондируемой дистанции.

Однако нахождение взаимозависимости коэффициентов для приземного слоя атмосферы, как правило, затруднено из-за значительного разнообразия микрофизических и оптических параметров рассеивающих частиц (аэрозоль, пыль, сажа и т. д.). Существующие методы определения микрофизических свойств частиц рассеивающей среды основаны на использовании результатов зондирования рассеивающего объекта (рассеивающая среда, слой) [2] лидаром на нескольких длинах волн и значительного объема априорной информации. В результате задача определения микроструктуры рассеивающей среды из лидарных данных становится некорректной, так как параметрам исследуемого объекта соответствует бесконечное множество решений лидарных уравнений для нескольких длин волн. Для наиболее вероятного решения применяют различные критерии (выбирают невязки, параметры регуляризации, критерии усреднения полученных решений и т. д.). Также для решения требуются предположения об оптических и физических свойствах аэрозоля (диапазон для действительной и мнимой частей коэффициента преломления, вид функции распределения частиц по размерам и т. д. [3]). Решением задачи являются параметры функции распределения частиц по размерам, а также значения действительной и мнимой частей коэффициента преломления. Найденное решение, как правило, характеризуется большим диапазоном определяемых параметров аэрозоля. Из-за этого перспективы метрологического обеспечения дистанционных измерений микроструктуры рассеивающей среды выглядят неопределёнными. Описанные методы применяют для случаев, когда некоторый объем априорной информации об аэрозоле известен (вид функции распределения, диапазон

коэффициента преломления и т. д.) [4], например, при зондировании стратосферных облаков [5]. Однако в этом случае возникают значительные трудности при сопоставлении восстановленных и измеренных характеристик стратосферного аэрозоля. Нижний слой атмосферы содержит полидисперсные и несферические частицы, неоднородные по составу, размерам и оптическим свойствам. Это не позволяет использовать методы решения некорректной обратной задачи. При зондировании несферических частиц часто используют модели частиц в виде вытянутых и сплюснутых сфероидов [6]. Однако и в этой задаче актуальна разработка методов сопоставления микроструктур модельной и реальной сред. Базовые коэффициенты лидарного зондирования – коэффициент обратного рассеяния и коэффициент экстинкции – не являются индикаторами размеров и концентрации частиц. В пренебрежении многократным рассеянием поперечная трансформация распространяющегося в среде пучка может быть связана с рассеянием на частицах среды. Чем больше поперечный размер частицы, тем меньше угол рассеяния. В [7] на примере специальных экранов показано, что угловую трансформацию пучка, прошедшего через состоящий из рассеивающих частиц слой, можно представить в виде суммы геометрически неискажённой волны и ореола, образованного рассеянием вперёд. Такой подход делает возможным сопоставление микроструктуре исследуемого слоя микроструктуры оптически эквивалентного (модельного) слоя, состоящего из монодисперсных сферических частиц с эквивалентными сечениями. Эквивалентный слой имеет такие же базовые коэффициенты (коэффициент обратного рассеяния и коэффициент экстинкции) и угловое искажение пучка, как исследуемая среда. Тогда угловому размеру ореола и коэффициенту пропускания можно сопоставить концентрацию эквивалентных частиц. Обратное рассеяние и концентрация эквивалентных частиц позволяют определить дифференциальное сечение обратного рассеяния на отдельной эквивалентной частице. В этом случае сигнал обратного рассеяния можно использовать для определения концентрации эквивалентных частиц. Ранее обосновано, что эквивалентное сечение определяется отношением второго момента для функции распределения частиц по поперечным сечениям к соответствующему моменту первого порядка [7]. Экспериментально определить эквивалентные сечения частиц через геометрию ореола позволяют экраны, изготовленные по изображениям как полидисперсных, так и несферических частиц. Значение коэффициента экстинкции и эквивалентное сечение частицы определяют концентрацию частиц в рассеивающем слое.

Цель исследования – в рамках модели одночастотных лидаров с однопозиционной схемой (ОПС) и двухпозиционной схемой (ДПС) рассмотреть способы выбора оптимальных трасс для измерения микроструктуры рассеивающих объектов с применением эквивалентных сечений.

**Однопозиционная схема зондирования.** На рис. 1 представлены два вида случайных пропускающих экранов (СПЭ),

где  $d_{и.ч}$  – поперечный размер изображений монодисперсных частиц;  $n_{и.ч}$  – поверхностная плотность изображений частиц.

Экран  $p$ -типа (*positive*,  $2d(p)$ -экран) получен по чёрно-белому контрастному снимку частиц рассеивающего слоя. Экран  $n$ -типа (*negative*,  $2d(n)$  перфорированный экран) – негатив экрана  $p$ -типа. На приведённых экранах белым цветом обозначены прозрачные участки ( $p=1$ ), чёрным цветом – непрозрачные участки ( $p=0$ ). При прохождении пучка через СПЭ происходит поглощение и трансформация поперечного размера пучка. Угловой размер пучка после прохождения СПЭ увеличивается за счёт дифракции на изображениях частиц. Указанный экран действует на пучок следующим образом: 1) поглощает пучок; 2) производит поперечные искажения пучка, обусловленные дифракцией на изображениях частиц. Для  $2d(p)$ -экрана увеличение углового размера пучка происходит за счёт дифракции на непрозрачных участках экрана, для  $2d(n)$ -экрана – за счёт дифракции на отверстиях экрана.

$2d(p)$ -экран является аналогом рассеивающего объекта по коэффициенту экстинкции и угловому искажению пучка. С некоторым увеличением микроструктура этого экрана воспроизводит (копирует) микроструктуру исследуемого слоя. По поперечным искажениям прошедшего через экран пучка можно смоделировать соответствующие искажения пучка для исследуемого рассеивающего слоя. Указанные искажения пучка (поля зрения) возникают из-за появления ореола при рассеянии вперёд на непрозрачных участках экрана. Для  $2d(p)$ -экрана энергия ореола много меньше энергии геометрически неискажённого пучка.

Согласно принципу Бабинне, практически весь пучок, прошедший через  $2d(n)$ -экран, трансформируется в энергию ореола [7]. Этот экран предназначен для определения углового размера ореола.

Рассмотрим идеальные схемы зондирования, в которых поля зрения и угловые размеры пучков для всех каналов одинаковы. В коаксиальном канале идеальной ОПС детектор совмещён с излучателем и поле зрения детектора совпадает с угловым размером пучка (рис. 2).

В точке  $O(0; 0)$  находятся точечные приёмник и источник. Формирующий поля зрения и геометрию пучка объектив  $L$  с фокусным расстоянием  $F$  имеет радиус  $a$  и расположен в плоскости отверстия. Предположим, что детектор и излучатель находятся в фокальной плоскости объектива. Диаметр приёмника и излучателя обозначим как  $d$ . На дальних дистанциях поле зрения и угловой размер пучка близки к углу  $\Phi_0 = d/F$ .

Трассовую зависимость сигнала обратного рассеяния от поверхности объекта в пределе геометрической оптики можно представить в виде

$$I(z) = I_0 / (z/Z_6)^2 \quad \text{при } z > Z_6, \quad (1)$$

где  $I_0$  – сигнал обратного рассеяния на расстоянии  $Z_6$ ;  $Z_6$  – длина ближней зоны (на расстоянии  $Z_6$  до некоторой плоскости диаметр пучка равен диаметру выходной апертуры объектива).

Длину ближней зоны  $Z_6$  можно оценить по отношению диаметра  $2a$  отверстия с линзой (см. рис. 2) к образованному полюм зрения углу  $\Phi_0$ .

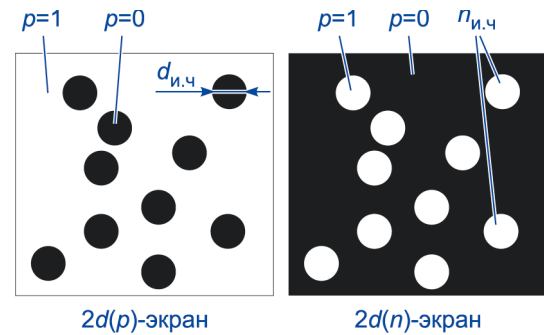


Рис. 1. Случайные пропускающие экраны  $p$ -типа ( $2d(p)$ -экран) и  $n$ -типа ( $2d(n)$ -экран)

Fig. 1. Random transmission screens of  $p$ -type ( $2d(p)$ -screen) and  $n$ -type ( $2d(n)$ -screen)

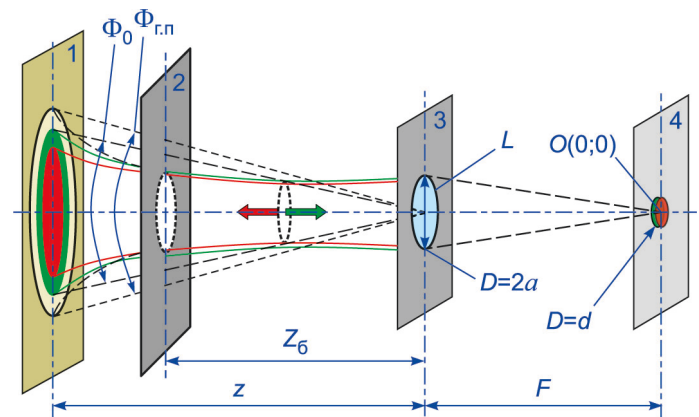


Рис. 2. Идеальная коаксиальная схема зондирования: 1 – рассеивающая плоскость; 2–4 – плоскости расположения соответственно экрана, апертуры приёмного и передающего каналов, приёмника и передатчика

Fig. 2. Ideal coaxial sensing scheme: 1 – scattering plane; 2 – the plane of the screen; 3 – the plane of the aperture of the receiving and transmitting channels; 4 – the plane of the receiver and transmitter

На расстояниях  $z > Z_6$  размер пучка представляет собой конус с вершиной в плоскости объектива, при  $z < Z_6$  происходит немонотонное формирование геометрии пучка с образованием перетяжки и зависимость (1) не выполняется. Угол  $\Phi_0$  определяется отношением диаметра приёмной площади  $d$  к фокусному расстоянию  $F$  линзы  $L$ . Отсюда следует, что начиная с расстояния  $Z_6$  поперечный размер пучка монотонно увеличивается. Следовательно, расстояние  $Z_6$  можно выбрать как минимальное для размещения экрана, созданного по изображениям частиц.

Установка СПЭ на расстоянии  $z \geq Z_6$  приведёт к одновременному увеличению поля зрения и углового размера пучка. Поперечную трансформацию зондирующего пучка можно смоделировать в виде суперпозиции геометрически неискажённой части пучка и ореола, образованного в результате рассеяния вперёд на неоднородностях экрана. В таком представлении угловое искажение пучка из точки  $O(0; 0)$  описывается выражением [7]:

$$z_{г.п}^{-2} = p^2/z^2 + (1-p^2)/z_{ор}^2, \quad (2)$$

где  $z_{г.п}$  – расстояние, на котором геометрический размер пучка без СПЭ равен геометрическому размеру пучка с СПЭ;  $p$  – пропускание СПЭ;  $z$  – расстояние от выходной апертуры линзы  $L$  до поверхности объекта;  $z_{ор}$  – расстояние между поверхностью объекта и входным объективом коаксиальной схемы, формирующей пучок (поле зрения) с угловым размером ореола при рассеянии вперёд  $\Phi_{ор}$ .

В (2) учтено двукратное пересечение пучком экрана при проходе пучка в сторону поверхности объекта и обратно. Из (2) следует, что при наличии СПЭ наблюдаемый угловой размер пучка  $\Phi_{г.п}$  из точки  $O(0; 0)$  будет больше из-за поперечного искажения пучка на рассеивающих неоднородностях СПЭ. Угловой размер прошедшего через СПЭ пучка  $\Phi_{г.п}$  найдём по  $z_{г.п}$  (см. (2)) [7]:

$$\Phi_{г.п} = (z_{г.п}/z)\Phi_0.$$

Для  $2d(p)$ -экрана первое слагаемое в правой части выражения (2) представляет собой геометрически неискажённую часть пучка, второе слагаемое описывает геометрию ореола, при этом первое слагаемое существенно больше второго.

Для  $2d(n)$ -экрана второе слагаемое много больше первого из-за того, что вся мощность прошедшего через  $2d(n)$ -экран пучка формирует геометрию ореола. В этом случае угловой размер ореола будет определён через  $z_{ор}$  с максимальной точностью, так как именно второе слагаемое в (2) содержит информацию об угловом размере ореола через  $z_{ор}$ .

Из (2) следует, что при установке  $2d(n)$ -экрана на расстоянии  $Z_6$  интенсивность  $I_1(z)$  от поверхности объекта начинает убывать быстрее с расстоянием из-за одновременного увеличения поля зрения и углового размера пучка (см. (1)):

$$I_1(z) = p^2 I_0 Z_6^2 / z_{г.п}^2, \quad (3)$$

где  $I_0$  – интенсивность на расстоянии  $Z_6$  без  $2d(n)$ -экрана;  $p$  – пропускание  $2d(n)$ -экрана.

Отметим, что поперечный размер пятна, соответствующий  $\Phi_{г.п}$ , находится между угловым размером ореола и поперечным размером пучка ( $z_{г.п} > z$ , см. рис. 2). Из (3) следует, что значение  $Z_6$  является аналогом продольного размера зондирующей схемы без линз. Из выражения (3) следует, что пропускание экрана определяется как

$$p = \frac{z_{г.п}}{Z_6} \sqrt{I_1(z)/I_0}. \quad (4)$$

Выражение (4) учитывает поперечные искажения пучка через значение  $z_{г.п}$ . Тогда угловой размер ореола вокруг пучка  $\Phi_{ор}(2d(n))$  из находящейся на расстоянии  $Z_6$  плоскости  $2d(n)$ -экрана определяется как

$$\Phi_{ор}(2d(n)) = \Phi_0 \Gamma_{ор}; \quad (5)$$

$$\Gamma_{ор}(2d(n)) = (z_{ор} - Z_6)/(z - Z_6),$$

где  $\Gamma_{ор}(2d(n))$  – коэффициент углового увеличения для ореола из находящейся на расстоянии  $Z_6$  плоскости СПЭ (см. рис. 1).

Выражения (4), (5) дают базовые величины для дальнейшего восстановления микроструктуры эквивалентного  $2d(n)$ -экрана. Из (5) следует, что угловой размер ореола при установке СПЭ в плоскость объектива  $L$  составит

$$\Phi_{ор}(L) = (z_{ор}/z)\Phi_0.$$

Угловой размер ореола  $\Phi_{ор}(2d(n))$  из плоскости СПЭ может быть намного больше углового размера ореола из плоскости объектива  $\Phi_{ор}(L)$ .

Оптимальный размер изображений частиц  $d_{и.ч}$  на  $2d(n)$ -экране (см. рис. 1) должен составлять величину, равную отношению длины волны  $\lambda$  к угловому размеру приёмного канала  $\Phi_0$  [7]. Соответствующее увеличение  $\Gamma_{ор} = \lambda/(d_{и.ч}\Phi_0)$ . В этом случае СПЭ следует установить в плоскости объектива. Тогда угловой размер ореола будет в два раза превышать угловой размер пучка.

Такого же результата можно достичь перемещением  $2d(n)$ -экрана с  $\Gamma_{ор} = 1$  в сторону поверхности объекта (см. (5)). Таким образом, значение  $\Gamma_{ор} = 2$  можно выбрать в качестве оптимального.

Выражения (4), (5) содержат две неизвестные величины  $z_{г.п}$ ,  $z_{ор}$ , характеризующие поперечные искажения прошедшего через  $2d(n)$ -экран пучка. Следовательно, лидеры с ОПС не позволяют измерять такие искажения. Это не даёт возможности одновременно определить базовые характеристики  $p$ ,  $z_{ор}$  микроструктуры экрана. Измерять эти величины позволяет двухпозиционная схема.

**Двухпозиционная схема зондирования.** ДПС зондирования с двумя разделёнными оптическими каналами представлена на рис. 3.

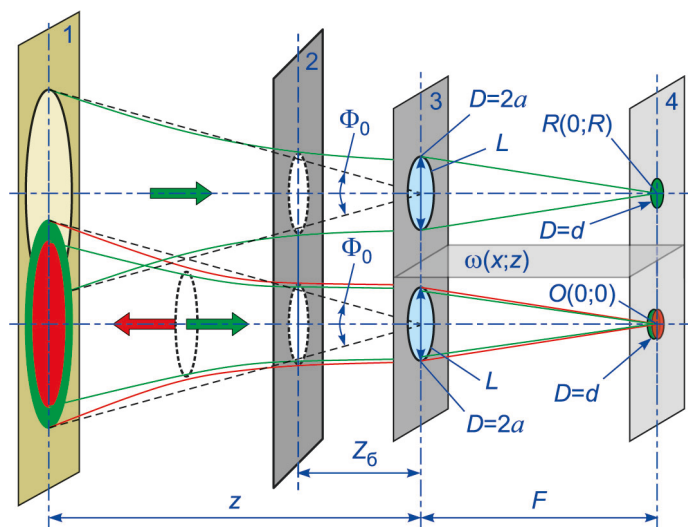


Рис. 3. Двухпозиционная схема зондирования с двумя приёмными каналами ДПС: 1–4 – то же что на рис. 2

Fig. 3. Two-position sounding scheme with two TPS receiving channels: the location of the main planes 1–4 as in Fig. 2

Выше перегородки  $\omega(x; z)$  находится оптическая ось дополнительного приёмного канала. Ниже указанной перегородки располагается основной коаксиальный канал, в котором передатчик и приёмник совмещены. Оптическая ось основного канала проходит через точку  $O(0; 0)$ . Канал с проходящей через точку  $O(0; 0)$  оптической осью, расположенный ниже перегородки  $\omega(x; z)$  представляет собой идеальную однопозиционную схему с ОПС. В идеальной ОПС поле зрения приёмного канала совпадает с угловым размером зондирующего пучка. ДПС в отличие от ОПС позволяет измерять отношение сигналов для основного и дополнительного приёмных каналов. Это отношение зависит от угловых искажений пучка (полей зрения).

Для рассматриваемой ДПС должны выполняться следующие требования: совпадение полей зрения первого и второго приёмных каналов с угловым размером зондирующего пучка на расстояниях  $z > Z_6$ ; соблюдение пределов геометрической оптики; параллельность оптических осей всех каналов.

Отношение сигналов  $\Pi(z) = I(R; z)/I(0; z)$  представляет собой в параксиальном приближении [8] геометрический форм-фактор приёмного и передающего каналов ДПС, и его можно представить в виде выражения (см. [9]):

$$\Pi(z) = \frac{I(R; z)}{I(0; z)} = \Pi\left(\frac{R^2}{4a^2(z/Z_6)^2}\right). \quad (6)$$

С учётом геометрии на рис. (3)  $\Pi(z) = 0$  при  $z = 0$ ,  $\Pi(z) = 1$  при  $z \gg Z_6$ . Трассовая зависимость (6) отношения сигналов является локальной калибровкой для ДПС. Измерения этой зависимости необходимы для определения поперечного искажения пучка. Например, увеличение поперечных размеров пучка приводит к увеличению измеряемого по локальной калибровке расстояния.

Из (6) следует, что в отсутствие искажений пучка (поля зрения) трассовая зависимость сигнала обратного рассеяния от поверхности объекта для дополнительного приёмного канала отличается от (1):

$$I(R; z) = I_0 \Pi(z) / (z/Z_6)^2.$$

Установка СПЭ в виде  $2d(n)$ -экрана приводит к угловому увеличению зондирующего пучка и полей зрения. В результате измеряемое по отношению интенсивностей расстояние увеличивается с  $z$  до  $z_{г.п}$ . Расстояние  $z_{г.п}$  для нового отношения сигналов при размещении  $2d(n)$ -экрана перед зондирующей системой может быть определено ДПС из данных локальной калибровки как

$$\Pi_3(z) = \Pi(z_{г.п}),$$

где  $\Pi_3(z)$  – отношение обратных сигналов при установке  $2d(n)$ -экрана;  $\Pi(z_{г.п})$  – соответствующее отношение обратных сигналов для поверхности объекта, находящегося на расстоянии  $z_{г.п}$  без  $2d(n)$ -экрана. Значение  $z_{г.п}$ , найденное с учётом локальной калибровки, даёт пропускание  $p$  экрана согласно выражению (4).

Используем (2) и найдём расстояние

$$z_{ор} = \sqrt{(1-p^2)/(z_{г.п}^{-2} - p^2 z^{-2})}. \quad (7)$$

Угловой размер ореола определяется выражениями (5). Угол  $\Phi_{ор}$  связан с углом дифракции от плоской волны  $\Phi_d$  выражением

$$\Phi_d = \Phi_{ор} - \Phi_0.$$

Таким образом, величины  $p$ ,  $\Phi_d$  измеряются с помощью схемы ДПС.

Эквивалентное сечение прозрачных отверстий  $S_{э.кв}$  и их поверхностная плотность  $n_{э.кв}$  на  $2d(n)$ -экране определяются как

$$S_{э.кв} = C_1 \pi (\lambda/\Phi_d)^2, \quad n_{э.кв} = p/S_{э.кв},$$

где  $C_1$  – калибровочный коэффициент.

Коэффициент  $C_1$  можно измерить с помощью стандартного  $2d(n)$ -экрана (см. рис. 1) с монодисперсными отверстиями. Этот экран должен иметь известные значения поверхностной плотности и поперечного сечения отверстий.

*Рассмотрим пример.* Допустим, поперечные размеры частиц равны  $100\lambda$  и  $\Phi_0 = 1$  мрад. Тогда угловой размер ореола от  $2d(n)$ -экрана, установленного в плоскости объектива, будет в 10 раз превышать угловой размер зондирующего пучка  $\Phi_0$ . Во втором слагаемом в выражении (2) знаменатель будет в 100 раз больше, чем в первом слагаемом только за счёт поперечных искажений пучка. Данная схема не является оптимальной в задаче измерения  $z_{ор}$  из-за малого значения второго слагаемого в (2). Измерения  $z_{ор}$  будут оптимальными, если размеры изображений частиц увеличить в  $\Gamma_{ор} = 10$  раз. В этом случае угловой размер ореола будет превышать в два раза угловой размер пучка (угол дифракции от плоской волны на отверстии равен угловому размеру пучка). Можно также не увеличивать изображения частиц, а переместить  $2d(n)$ -экран к поверхности объекта. Так, если  $Z_n = 100$  м,  $z = 110$  м, то расстояние  $z_{ор}$  из плоскости объектива  $L$ , найденное из (5), составит 200 м. Это означает, что угловой размер ореола, наблюдаемый из плоскости объектива ОПС, будет только в два раза превышать угловой размер зондирующего пучка. Такая геометрия является оптимальной в задаче измерения углового размера ореола. Таким образом, оптимальную схему измерений углового размера ореола можно реализовать как через увеличение изображений частиц, так и перемещением  $2d(n)$ -экрана в сторону поверхности объекта (см. рис. 2). Из этого примера следует, что угловой размер ореола, наблюдаемый из плоскости объектива, сравним с угловым размером пучка, а угловой размер ореола из плоскости СПЭ может существенно превышать угловой размер пучка.

Использование идеальных коаксиальных схем является перспективным для применения в миниатюрных лидарах с безопасным для глаз уровнем мощности зондирующего излучения. В [10] рассмотрена конфигурация миниатюрной зондирующей схемы с применением оптоволоконных делителей. Отмечены преимущества таких систем. В частности, геометрический форм-фактор приёмного и передающего каналов одинаков на всей дистанции. Использование диодных лазеров с управлением

током позволяет калибровать обратный сигнал установкой стандартных рассеивающих экранов [11] на трассе с фиксированной дальностью с последующим восстановлением формы лидарного сигнала из однородной атмосферы.

Предложенный подход характеризуется тем, что коэффициент пропускания и угловой размер ореола вокруг пучка выступают как ключевые параметры для микроструктуры эквивалентного рассеивающего объекта.

**Обсуждение результатов.** При использовании оптических элементов в виде линз в ближней зоне зондирующей системы возникает перетяжка пучка. После перетяжки поперечный размер пучка монотонно увеличивается с расстоянием и его трансформация определяется методами геометрической оптики. На расстоянии  $Z_6 = 2a/\Phi_0$  поперечный размер пучка (поля зрения) приблизительно равен размеру выходной апертуры объектива. Это минимальное расстояние, которое можно использовать в задаче измерения трансформации пучка. Оптимальной схеме измерений соответствует случай, когда угловой размер ореола от пересекающей рассеивающий объект плоской волны равен угловому размеру пучка. В этом случае угловой размер ореола от зондирующего пучка будет в два раза больше углового размера пучка ( $\Gamma_{op} \approx 2$ ). При использовании  $2d(n)$ - и  $2d(p)$ -экранов оптимальную схему измерений можно реализовать посредством линейного увеличения изображений частиц. Если  $2d(n)$ -экран изготовлен с коэффициентом линейного увеличения  $\Gamma = 2$  для малых частиц (более 1 мкм), то  $2d(n)$ -экран следует располагать на расстоянии  $Z_6 = 2a/\Phi_0$  от входного объектива. Если  $\Gamma = \lambda/(d_{и.ч}\Phi_0)$ , то для оптимальной схемы измерений  $2d(n)$ -экран следует располагать в плоскости выходного объектива. Таким образом, оптимальные схемы измерений можно получить как посредством изменения расстояния между СПЭ экраном и лидаром на трассах с фиксированной дальностью, так и по линейному увеличению изображений частиц на перфорированном  $2d(n)$ -экране. Чем дальше экран находится от лидара, тем меньше должно быть поперечное сечение изображений рассеивающих частиц. Поскольку эквивалентное сечение определяется однозначно только по угловому размеру ореола вокруг пучка, то для его измерения необходимо применение двухпозиционных схем. Кроме того, выбор углового размера ореола для определения эквивалентного сечения частиц позволяет применять такой метод, как для полидисперсных, так и несферических частиц. Наличие таких частиц является характерным для приземных слоёв атмосферы.

**Закключение.** В результате исследования схем измерений эквивалентных сечений частиц по угловому размеру ореола при рассеянии вперёд показано, что оптимальную схему измерений сечений частиц можно реализовать как через выбор коэффициента увеличения для изображений частиц, так и перемещением экрана вдоль линии зондирования. На примере экранов, созданных по изображениям частиц, показано, что с уменьшением размеров частиц рассеивающий экран следует располагать ближе к поверхности топографического объекта. Это даёт возможность выбирать оптимальные схемы измерений

эквивалентных сечений частиц в зондируемом слое на горизонтальных трассах. Предложенный подход применим к полидисперсным и несферическим частицам (сечения в виде невыпуклых фигур – нитей, изогнутых полос, колец и т. п.), для которых определение поперечных сечений по цифровым фотографиям представляет значительные трудности.

#### Список источников / References

1. Paramesvaran K., Rose K. O., Krishna Murthy B. V., *Applied Optics*, 1991, vol. 30, no. 21, pp. 3059–3071. <https://doi.org/10.1364/AO.30.003059>
2. Veretennikov V. V., Kozlov V. S., Naats I. E., Fadeev V. Ya., *Optics Letters*, 1979, vol. 4, no. 12, pp. 411–413. <https://doi.org/10.1364/OL.4.000411>
3. Chemyakin E., Burton S., Kolgotin A., Müller D., Hostetler C., and Ferrare R., *Applied Optics*, 2016, vol. 55, no. 9, pp. 2188–2202. <https://doi.org/10.1364/AO.55.002188>
4. Veselovskii I., Kolgotin A., Griaznov V., Muller D., Wandinger U., Whiteman D. N., *Applied Optics*, 2002, vol. 41, no. 18, pp. 3685–3699. <https://doi.org/10.1364/AO.41.003685>
5. Hoffnagle J. A., Jefferson C. M., *Applied Optics*, 2000, vol. 39, no. 30, pp. 5488–5499. <https://doi.org/10.1364/AO.39.005488>
6. Mishchenko M. I., *Journal Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, vol. 110, no. 11, pp. 808–832. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2008.12.005>
7. Арумов Г. П., Бухарин А. В. Использование специальных экранов, моделирующих рассеянное в среде излучение, для измерения эквивалентного поперечного сечения частиц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 298–306 [Arumov G. P., Buharin A. V., *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2021, vol. 18, no. 3, pp. 298–306. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-298-306>
8. Born M., Wolf E., *Principles of Optics*, 4th ed., Oxford and New York, Pergamon Press, 1970, 854 p.
9. Арумов Г. П., Бухарин А. В., Тюрин А. В. // Международная конференция MCC-14: Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность, 24–27 ноября 2014 г. Сборник трудов. М.: ЛЕНАНД, 2014. С. 18–23 [Arumov G. P., Buharin A. V., Tjurin A. V., *Proc. International Conference MSS-14 "Mode Conversion, Coherent Structures And Turbulence"*, Moscow, 24–27 November 2014, LENAND Publ., 2014, pp. 18–23. (In Russ.)].
10. Арумов Г. П., Бухарин А. В. Выбор конфигурации миниатюрного лидара для калибровки сигнала обратного рассеяния // Оптические методы исследования потоков: Труды XV Международной научно-технической конференции, 24–28 июня 2019. М.: Издательство «Перо», 2019. С. 23–31 [Arumov G. P., Buharin A. V., *Proc. 15th International Scientific and Technical Conference "Opticheskie metody issledovaniya potokov"*, 24–28 June, Moscow, Pero Publ., 2019, pp. 23–31. (In Russ.)].
11. Kavaya M. J., Menzies R. T., *Applied Optics*, 1985, vol. 24, no. 21, pp. 3444–3453. <https://doi.org/10.1364/AO.24.003444>

Статья поступила в редакцию 25.10.2021; одобрена после рецензирования 27.07.2022; принята к публикации 01.08.2022.  
The article was submitted 25.10.2021; approved after reviewing 27.07.2022; accepted for publication 01.08.2022.