

# Анализ оптимальных условий восстановления микроструктуры некоторых рассеивающих объектов по данным лидара с двухпозиционной схемой зондирования

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

*Институт космических исследований РАН  
117997 Москва, ул. Профсоюзная, д.84/32  
E-mail: [tumbul@iki.rssi.ru](mailto:tumbul@iki.rssi.ru)*

Произведен анализ оптимальных условий зондирования к рассеивающему объекту с заданными свойствами. Найден оптимальный диапазон вероятности пропускания случайного экрана и размеров непрозрачных пятен на случайном пропускающем экране. Обоснован метод микрофизической калибровки лидара с использованием непрозрачного экрана, имеющего случайные модуляции коэффициента пропускания в виде отверстий.

## Введение

В настоящее время основные перспективы лидарного зондирования связаны с использованием лазеров на нескольких длинах волн [1, 2]. При этом полученный набор данных по-прежнему не является достаточным для получения полной информации о микроструктуре рассеивающей среды. Вопросы, связанные с оптимизацией геометрии лидара к условиям зондирования и методические обоснования погрешности, практически не обсуждаются, либо обсуждаются только на примерах численного эксперимента. Важным аспектом применения подобных методик является использование дополнительной априорной информации об исследуемом объекте (функция распределения частиц по размерам, оптические свойства аэрозоля и т. д.) [2]. Использование этой информации носит в большинстве случаев субъективный характер, что препятствует широкому применению лидарных методов зондирования. В связи с этим необходимо детальное описание конкретных условий зондирования, при которых методы с использованием лидара на нескольких длинах волн могут быть обоснованы. Реализация измерений должна предполагать наличие способов калибровки, расчетов погрешностей и возможности оптимизации параметров установки к заданным условиям зондирования. Ранее [3] предложен метод с использованием лидара на одной длине волны, имеющего один передающий и два приемных канала (лидар с двухпозиционной схемой зондирования (ДПС(2)) (см. рис. 1). В этой схеме поле зрения одного из приемных каналов совпадает с зондирующим пучком и геометрически повторяет поле зрения второго приемного канала. По данным зондирования можно без априорной информации однозначно восстановить некоторый модельный рассеивающий объект, который производит такое же действие на зондирующий пучок, как исследуемая среда. Этот результат получен благодаря возможности измерения угловых искажений пучка. Метод применим и в случае полидисперсных частиц [4]. Обоснованы способы калибровки и расчета погрешности микрофизических параметров восстановленного эквивалентного объекта. В данной работе мы остановимся на вопросе оптимизации геометрии лидара с ДПС(2) к данным условиям зондирования.

## Приближение однократного рассеяния

По-прежнему рассматриваем трассу, ограниченную поверхностью тест-объекта. В начале трассы находится лидар с ДПС(2) (см. рис. 1). В этой схеме поле зрения одного из приемных каналов совпадает с зондирующим пучком и геометрически повторяет поле зрения второго приемного канала. После установки случайного пропускающего экрана (СПЭ) (см. рис. 2 (а)) сигнал от тест-объекта уменьшится из-за увеличения полей зрения приемных каналов и углового размера пучка. Для моделирования трассовой зависимости убывания сигнала используем зависимость [4].

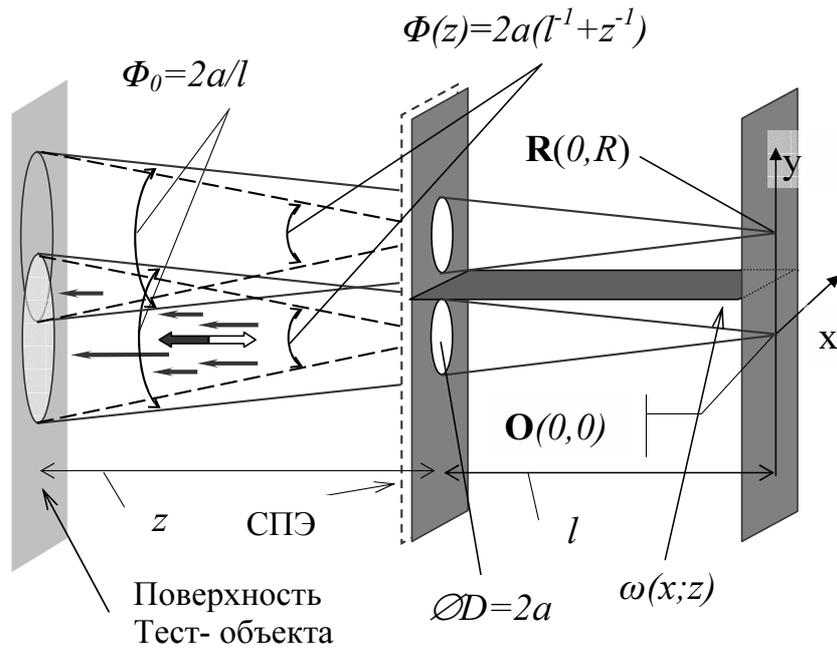


Рис. 1. Двухпозиционная схема зондирования с двумя приемными каналами ДПС(2). В этой схеме поле зрения основного оптического канала и угловой размер пучка сформированы нижним отверстием. Поле зрения дополнительного приемного канала сформировано верхним отверстием. Приемники и источник являются точечными и находятся в точках  $O$  и  $R$  плоскости наблюдения. Положение источника и приемника в точке  $O$  совпадают

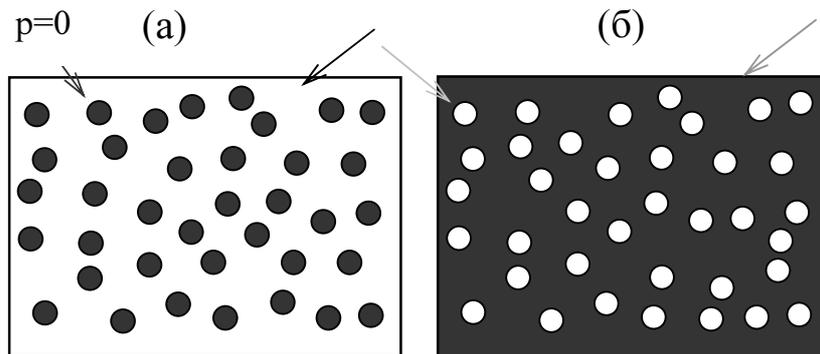


Рис. 2 (а,б). (а) СПЭ - прозрачный экран с непрозрачными пятнами, (б) СПЭ(н) - непрозрачный экран с отверстиями. Размеры отверстий и пятен одинаковы

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

Здесь  $p$  – коэффициент пропускания СПЭ,  $z$  – дистанция до тест-объекта,  $z_g$  – дистанция, измеряемая по увеличению перекрытия зондирующего пучка с полем зрения второго приемного канала. Для ДПС (2) эту дистанцию можно найти из трассовой зависимости отношения сигналов от тест-объекта,  $z_h$  – дистанция, измеряемая по отношению сигналов с угловым размером пучка равным угловому размеру гало. В левой части (1) трассовая зависимость убывания сигнала, измеренного основным приемным каналом, поле зрения которого совпадает с зондирующим пучком. Увеличение скорости убывания сигнала с дистанцией равносильно увеличению углового размера пучка и полей зрения приемных каналов. Это приводит к увеличению перекрытия поля зрения второго приемного канала с зондирующим пучком. В (1)  $z_g$ ,  $z$ ,  $p$  измеряемые величины. Следовательно, параметр углового размера гало  $z_h$  может быть найден из (1) поскольку является единственным неизвестным. Если угловой размер пучка  $\varphi_0$  известен, то угловые размеры  $\varphi_h$  и  $\varphi_g$  определяются из соотношений

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

Это выражение определяет угловой размер гало из измеряемой по отношению интенсивностей дистанции. Ранее было обосновано, что угловой размер гало связан с дифракционным углом  $\varphi_d$  соотношением

$$\varphi_h = (\varphi_0^2 + \varphi_d^2)^{0.5} \quad (3)$$

Дифракционный угол  $\varphi_d$  – это угол, под которым рассеивает плоскую волну непрозрачное пятно (или отверстие того же диаметра).

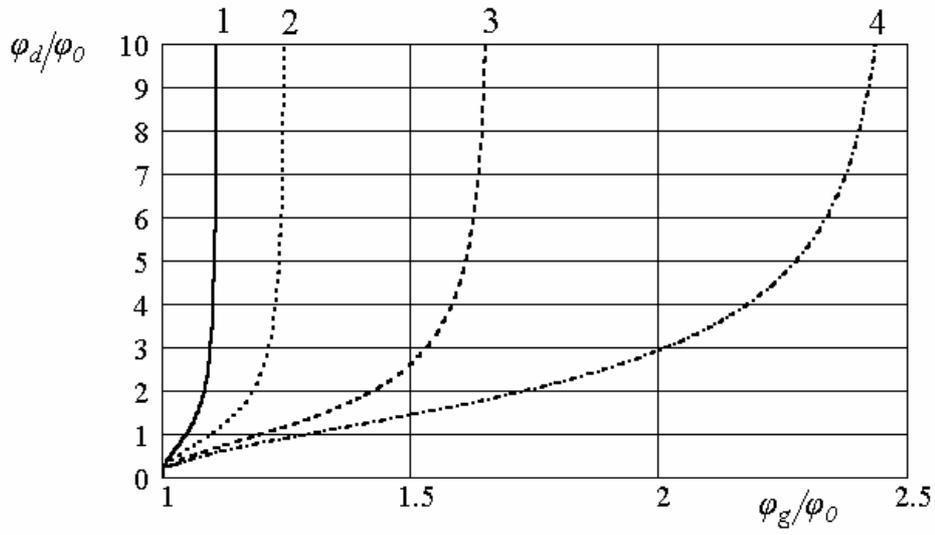
Выражение (3) справедливо, если пятна рассеивают падающее излучение независимо друг от друга, что соответствует приближению однократного рассеяния. Будем считать такое приближение справедливым при  $p > 0.5$ .

Подставляя (2) и (3) в (1) получаем для диапазона измеряемых углов пределы

$$1 < \varphi_g / \varphi_0 < p^{-1} \quad (4)$$

Рассмотрим вопрос об оптимальных условиях измерения дифракционного угла  $\varphi_d$ . Угловое зрение передающего и приемных каналов будем считать заданными. На рисунке 3(а) представлена зависимость отношения  $\varphi_d' / \varphi_0$  от  $\varphi_g' / \varphi_0$  для различных значений  $p$  вероятности пропускания СПЭ. Эти зависимости можно получить экспериментально. Для этого на трассе фиксированной длины следует произвести измерения угловых искажений пучка для заданных СПЭ с непрозрачными пятнами различных размеров, но с определенной вероятностью пропускания. По сути, посредством стандартных СПЭ можно произвести локальную калибровку ДПС(2) см [3]. Из рисунка 3(а) видно, что с уменьшением вероятности пропускания экрана увеличивается область пропорциональности между параметром углового искажения пучка и дифракционным углом. Таким образом, оптимальный диапазон измерения дифракционного угла увеличивается с уменьшением вероятности пропускания СПЭ. Этот диапазон легко проанализировать на рисунке 3(б). На этом рисунке представлена зависимость производной  $\varphi_d' / \varphi_0$  от  $\varphi_g' / \varphi_0$  для различных значений вероятности пропускания СПЭ. Будем учитывать выражение (2) для измеряемого углового искажения пучка  $\varphi_g$  через дистанцию  $z_g$ , найденную по отношению сигналов основного и дополнительного каналов ДПС(2). Ранее было обосновано, что  $z_g$  может быть измерено с точностью  $\delta = 0.01$ . В режиме счета фотонов это соответствует количеству фотоотчетов более  $\delta^{-2} = 10^4$ . Именно этот уровень погрешности будем использовать для дальнейшего анализа. По сути, ордината на рисунке 3(б) дает коэффициент, на который надо помножить относительную погрешность  $\delta \varphi_g$  (отметим,  $\delta \varphi_g = \delta z_g$ ) чтобы получить относительную погрешность  $\delta \varphi_d$ . Рассмотрим случай  $p = 0.9$ . Этому случаю соответствует кривая 1, см рис 3(б). Из этой зависимости следует, что угол  $\varphi_g$  можно измерить с минимальной погрешностью более 15%. Даже погрешности 20% соответствует узкий диапазон  $1.01 < \varphi_d' / \varphi_0 < 1.06$ . Этот случай не оптимален для измерений, так как даже теоретическая погрешность измерения дифракционного угла велика. Кривая 2 на рисунке 3(б) соответствует вероятности пропускания СПЭ  $p = 0.8$ . Из этой кривой следует, что только в узком диапазоне  $1.02 < \varphi_d' / \varphi_0 < 1.13$  погрешность в измерении дифракционного угла составляет величину менее 10%. Наиболее оптимальные случаи соответствуют относительно небольшим вероятностям пропускания  $p < 0.6$ . В этом случае точность измерения дифракционного угла в диапазоне  $1.01 < \varphi_d' / \varphi_0 < 1.5$  может достигать значений менее 4%. С дальнейшим уменьшением вероятности пропускания диапазон и точность измерения дифракционного угла возрастают. Для наглядности приведем пример. Пусть мы имеем тонкий рассеивающий слой с  $p = 0.6$ . Угловой размер пучка 1 мрад, длина трассы 100 м. Расстояние между оптическими осями ДПС(2) должно составлять величину около  $100 * 10^{-3} = 10$  см. В качестве оптимального дифракционного угла можно выбрать  $\varphi_d = 1.2 \varphi_0$ , что соответствует размеру частиц  $d_c = 1.2 \lambda / \varphi_0$ . Если угловое искажение пучка измерено с точностью 1%, то размер частиц можно измерить с погрешностью не менее 4%.

(a)



(б)

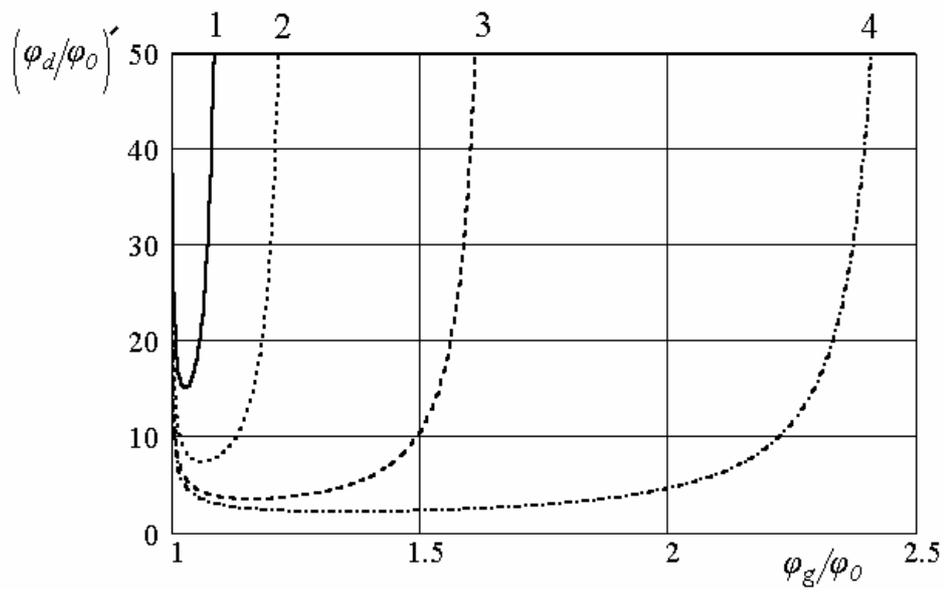


Рис. 3(а,б). (а) - Зависимость дифракционного угла  $\varphi_d/\varphi_0$  (а) и его производной (б) от параметра углового искажения пучка  $\varphi_g/\varphi_0$  при различных вероятностях  $r$  пропускания СПЭ; кривой 1 соответствует  $r=0.9$ , кривой 2  $r=0.8$ , кривой 3  $r=0.6$ , кривой 4  $r=0.3$

## Границы оптимального диапазона

Для любого СПЭ существуют границы оптимального диапазона вероятности пропускания. Первый случай соответствует  $\varphi_g/\varphi_0 \sim 1$ . Непрозрачные пятна имеют большие размеры, при которых дифракционный угол мал по сравнению с угловым размером пучка или  $d_c \gg \lambda/\varphi_0$  ( $d_c$  – диаметр непрозрачного пятна СПЭ,  $\lambda$  – длина волны зондирующего излучения,  $\varphi_0$  – угловой размер пучка). Кривые 1, 2 см рис 3(б) при стремлении  $\varphi_g/\varphi_0$  к 1 асимптотически стремятся к бесконечности. Второй случай – условие существования СПЭ. Если приближение  $\varphi_g/\varphi_0 < p^{-1}$  выполняется, то исследуемому СПЭ всегда можно сопоставить эквивалентный СПЭ. При стремлении  $\varphi_g/\varphi_0$  к  $p^{-1}$  погрешность определения дифракционного угла стремится к бесконечности см кривые 1, 2 на рисунке 3(б). В дальнейшем при  $\varphi_g/\varphi_0 > p^{-1}$  мы имеем приближение фазового экрана. Для фазового экрана с  $p=0$  угловое искажение пучка существует, а выражение (1) теряет смысл.

Дальнейшее увеличение диапазона измерений дифракционного угла можно произвести посредством увеличения расстояния до СПЭ или (и) увеличением времени измерения. Указанное рассмотрение справедливо при  $p > 0.5$ . В этом случае дифракционный угол  $\varphi_d$  определяет размер непрозрачного пятна на СПЭ, а эффектами многократного рассеяния можно пренебречь.

Рассмотрим случай многократного рассеяния  $p \ll 1$ . Пусть вместо СПЭ мы имеем его негатив (СПЭ(н)) см рис 2(б), в котором пятна заменены отверстиями того же диаметра в непрозрачном экране. Задача заключается в определении поверхностной плотности и размера отверстий на СПЭ(н).

Пусть угловой размер гало не сильно отличается от углового размера пучка. Тогда можно пренебречь первым слагаемым в правой части выражения (1). Во втором слагаемом пренебречь  $p^2$  по сравнению с 1. В такой задаче с достаточной степенью точностью справедливо равенство

$$l_h = l_g, \quad \text{или} \quad \varphi_h = \varphi_g \quad (5)$$

При заданных параметрах микрофизической калибровки ДПС(2) [3] размер и поверхностная плотность отверстий на СПЭ(н) определяются выражениями

$$d_h = C_3 \lambda / \varphi_0, \quad n_h = C_4 / d_c^2 \quad (6)$$

Напомним,  $C_3$  определяет эффективный размер отверстий на СПЭ(н),  $C_4$  характеризует форму отверстий ( $C_4 = 4/\pi$  для круглых отверстий,  $C_4 = 1$  для квадратных отверстий и т. д.). Обратим внимание на то, что в выражении (6) мы пренебрегли вероятностью пропускания  $p$  для СПЭ(н). Кроме того, малая вероятность пропускания приведет к дальнейшему увеличению точности определения дифракционного угла см рис 3(б) кривые 3, 4 и к увеличению оптимального диапазона измерения вероятности  $p$  см (4). Следовательно, СПЭ(н) имеет преимущества по сравнению с СПЭ в задаче определения коэффициентов микрофизической калибровки  $C_3$  и  $C_4$ .

Промежуточным случаем является большая поверхностная плотность непрозрачных пятен на СПЭ или  $p > 0.5$ . Слагаемые в правой части (1) могут не сильно отличаться друг от друга. В такой ситуации эффекты многократного рассеяния могут давать решающий вклад в формирование геометрии диффузного гало. Выражение (3), определяющее дифракционный угол  $\varphi_d$ , теряет смысл. Такая ситуация требует экспериментальных исследований зависимости вклада многократного рассеяния от поверхностной плотности пятен на СПЭ [3].

При переходе от СПЭ к рассеивающей среде результатов калибровки по СПЭ или СПЭ(н) может быть недостаточно, поскольку вклад эффектов многократного рассеяния для СПЭ может быть существенно меньше, чем для рассеивающей среды. Однако, протяженную рассеивающую среду можно смоделировать последовательностью СПЭ с большими  $p$ . Эти экраны следует расположить вдоль трассы зондирования с некоторым шагом. Таким образом, в работе обоснована возможность экспериментальной калибровки ДПС(2) для получения микроструктуры рассеивающей среды, как для малых, так и для больших оптических толщ.

## Заключение

В работе показано, что технические и геометрические характеристики ДПС(2) можно выбрать оптимальными для измерения микроструктуры СПЭ и тонких рассеивающих слоев с заданными оптическими свойствами. Оптимальный диапазон измерения вероятности пропускания определяется уровнем погрешности измерения углового искажения пучка и увеличивается с увеличением вероятности пропускания. Указанный подход может быть применен для анализа оптимальных условий зондирования протяженных рассеивающих сред.

## Литература

1. Лазерный контроль атмосферы. Под ред. Хинкли Э. Д. // М.: Мир, 1979. 416 с.
2. *Veselovskii I., Kolgotin A., Griaznov V., Muler D., Wandinger U., Whiteman D. N.*, Inversion with regularization for the retrieval of tropospheric aerosol parameters from multiwavelength lidar sounding // *Appl. Opt.* 2002. Vol. 41. No. 18. С. 3685-3699.
3. *Арумов Г. П., Бухарин А. В., Ерохин Н. С.* Метод определения микрофизических параметров рассеивающих сред двухпозиционными схемами зондирования. // Институт космических исследований РАН. Пр-2095. Москва 2003. 19 с.
4. *Арумов Г. П., Бухарин А. В.* Определение микрофизических параметров эффективной рассеивающей среды по данным, полученным двухпозиционными схемами зондирования // Тез. 2 открытой Всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы методов восстановления различных параметров окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов по данным дистанционного зондирования)». ИКИ РАН. Москва, 16-18 нояб. 2004. [Электрон. ресурс]. Москва. С. 38. 1 электрон. опт. диск (CD-WROM).