

Проблема неопределенностей при экспериментальном определении угловой геометрии ореола от плоской волны в рассеивающей среде

Г.П. Арумов, А.В. Бухарин

*Институт космических исследований РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: tumbul@iki.rssi.ru, www.iki.rssi.ru/lidartps1*

Проблема неоднозначности определения микрофизических параметров рассеивающих сред является до сих пор актуальной. Для рассмотренных ранее двухпозиционных схем зондирования, использующих приемники, работающие в режиме счета фотонов, первоначально возникает неоднозначность при измерении углового размера как поля зрения, так и зондирующего пучка [1]. Существующие методы измерения поля зрения являются чувствительными к геометрии поля зрения приемного канала (поперечного распределения частоты срабатываний детектора от точечного источника света). В этой связи отметим два характерных случая; поперечное распределение частоты срабатываний приемника описывается гауссовым распределением и распределением Коши. Для гауссова распределения существуют поперечные моменты любых порядков. По этим моментам можно найти практически любые свойства таких функций (асимметрия, эксцесс и др.). Для распределения Коши не существует поперечных моментов, поскольку соответствующие интегралы расходятся. В этой связи предложен метод определения углового размера поля зрения практически не чувствительный к виду указанной функции распределения. Метод основан на поиске максимума функции являющейся произведением поля зрения на поперечную координату. Предложенный метод позволяет проанализировать способ расчета погрешности для углового размера поля зрения.

Следующая неоднозначность связана с тем, что метод определения углового размера ореола от плоской волны, пересекающей рассеивающий объект, зависит от вида радиального распределения коэффициента пропускания внутри отдельной рассеивающей неоднородности. Ранее обоснована методика, использующая априорные предположения о справедливости свойств гауссовых распределений для измерения углового размера ореола и неискаженного пучка [1, 2]. Предпосылками такого обоснования является существование гауссовых пучков и узких диаграмм рассеяния вперед крупными неоднородностями. При этом внутри неоднородности поперечное распределение для функции пропускания так же должно быть гауссовым.

При наблюдении точечного источника через рассеивающий объект поле зрения приемного канала увеличивается за счет появления ореола рассеяния вперед. Если для описания геометрии поля зрения гауссова аппроксимация не справедлива, то угловой размер ореола, в приближении плоской волны, можно определить как разность параметров угловых размеров ореола, возникающего в рассеивающей среде и неискаженного поля зрения. При этом обосновано, что погрешность размера ореола от плоской волны определяется суммой погрешностей для углового размера поля зрения приемного канала и углового размера ореола. Эта погрешность всегда больше погрешности для величин с гауссовыми распределениями. Указанные выводы справедливы и для зондирующих пучков.

Таким образом, сценарий определения информации о микрофизических свойствах аэрозоля может практически не использовать априорных предположений о рассеивающей среде.

Измерение поля зрения

Основой экспериментальной установки являлся приемный канал с узким полем зрения $\sim 10^{-3}$ рад. Входная апертура приемного канала составляла 14 мм. В фокусе приемного объектива ис-

пользован кремниевый лавинный фотодиод с пикосекундным временем отклика и коэффициентом усиления до 10^9 . Характерный размер чувствительной области составляет 40 мкм. Чувствительная область приемной площадки имеет квантовую эффективность, монотонно уменьшающуюся от центра (20%) к периферии. Приемник работает в режиме счета фотонов. Частота срабатываний приемника пропорциональна световому потоку от источника в поле зрения приемного канала.

Общая схема измерений поля зрения без исследуемого экрана 3 представлена на рисунке 1. Для измерения поля зрения был использован точечный источник света в виде лампы накаливания 2, с размером светящейся области 2 мм. При перемещении этого источника в поле зрения приемного

Схема экспериментальной установки

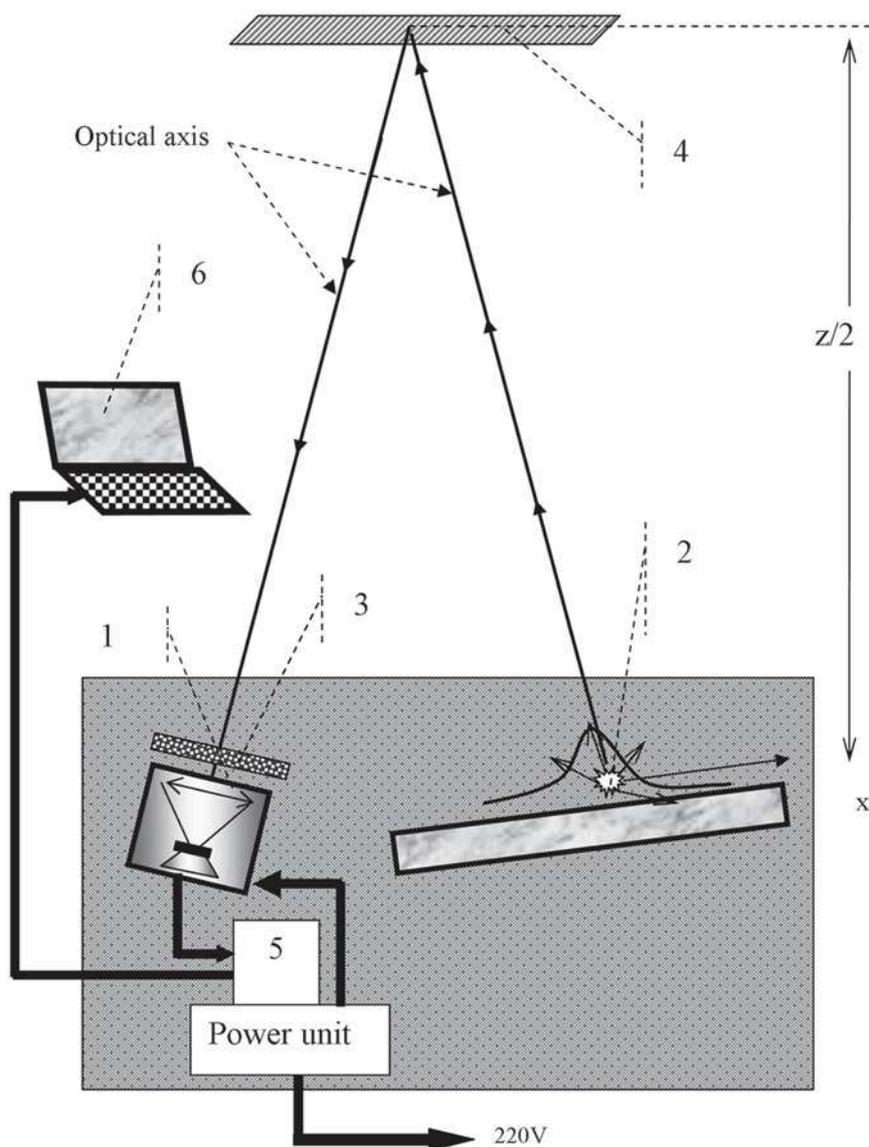


Рис. 1. Схема измерений. 1 – приемный канал, 2 – точечный источник, 3 – исследуемый экран, 4 – зеркало, 5 – интерфейс, 6 – компьютер

канала 1 частота срабатываний приемника изменяется от максимума, когда источник находится на оптической оси приемного канала до нуля на периферии. Возможны два предельных случая для радиального распределения частоты срабатываний приемника. В первом случае радиальное распределение близко к гауссову распределению; во втором случае соответствующее распределе-

ние близко к распределению Коши. Возникает неопределенность, связанная с тем, что метод измерения углового размера зондирующего пучка зависит от вида радиального распределения частоты срабатываний приемника. В этой связи представляет интерес метод измерения углового размера зондирующего пучка, не зависящий от вида указанных распределений. В качестве одного из возможных можно предложить метод, основанный на поиске максимума функции $R(\rho)$:

$$R(\rho) = \rho J(\rho), \quad (1)$$

здесь ρ – радиальная координата, $J(\rho)$ – радиальное распределение частоты срабатываний фотоотсчетов приемника, ρ – смещение относительно оптической оси приемного канала. Это распределение можно построить посредством измерения зависимости частоты срабатываний детектора от положения точечного источника в плоскости наблюдения. При этом возможно применение алгоритмов аппроксимации с использованием методов численного моделирования. На рисунке 2 представлено поле зрения приемного канала при $z=26$ м и проиллюстрирован способ определения

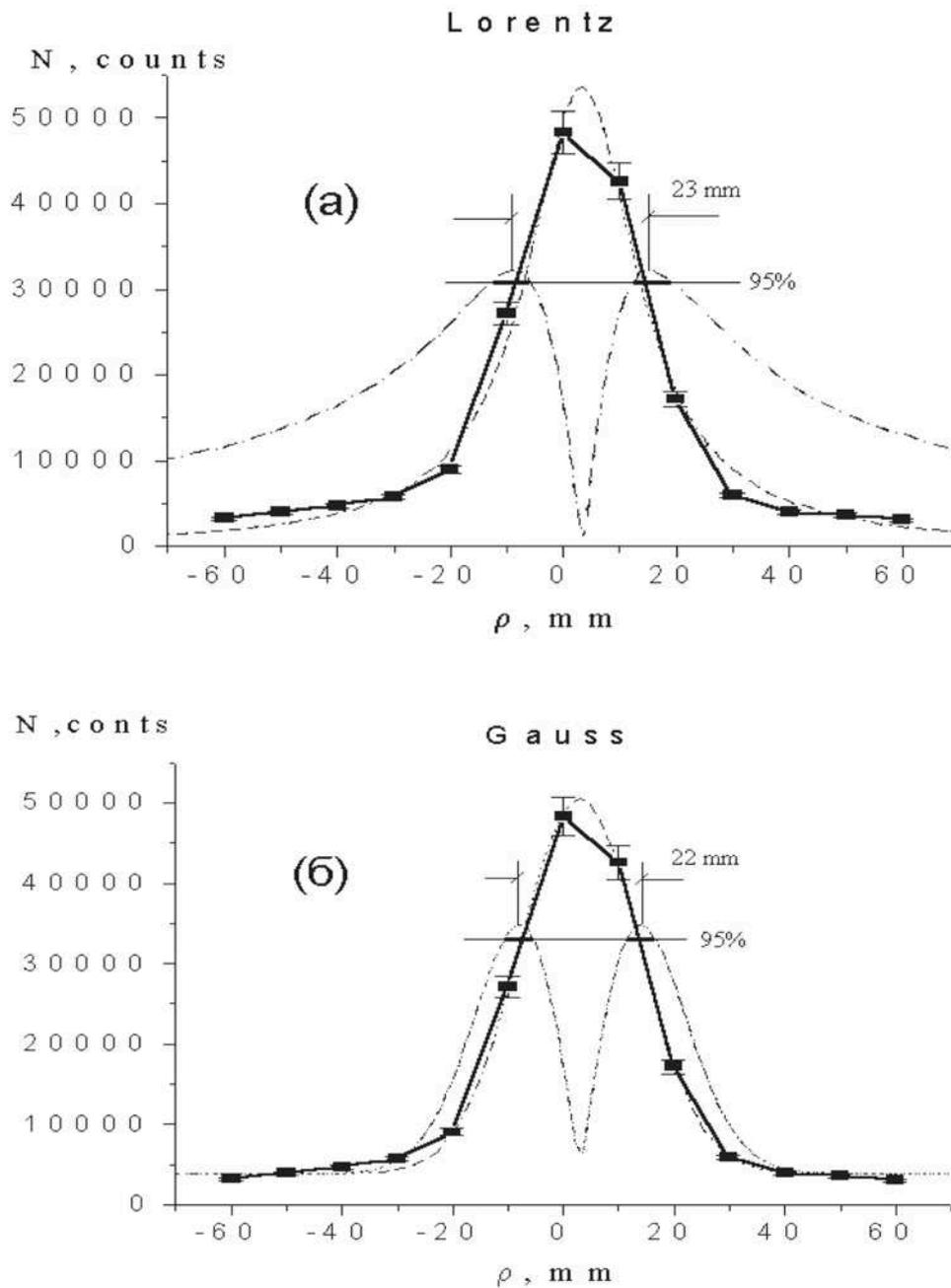


Рис. 2. Иллюстрация способа измерения углового размера поля зрения с использованием Лоренцевой (а) и Гауссовой (б) аппроксимаций

поля зрения приемного канала посредством алгоритмов аппроксимации (Гаусс и Лоренц), используемых в программе Origin. Из эксперимента найден параметр поля зрения на 26 м, который по результатам этих аппроксимаций составил 23 мм (10%) (Лоренцева аппроксимация) и 22 мм (Гауссова аппроксимация), что соответствует ~ 0.9 мрад. Найденное поле зрения является характеристикой ширины распределения для частоты срабатываний детектора в зависимости от смещения точечного источника относительно оптической оси приемного канала. Для оценки способа расчета погрешности необходимо сделать выбор между предложенными типами аппроксимаций. Погрешность числа фотоотсчетов позволяет выбрать порог, превышение над которым дает диапазон погрешности для поля зрения. В нашем случае таким порогом можно выбрать величину 95% от максимума для распределения (1). Пусть мы имеем возможность внести заданные искажения в поле зрения приемного канала, установив перед входным объективом непрозрачный экран с отверстиями заданного размера. После установки такого экрана поле зрения увеличивается за счет появления ореола. Угловой размер ореола можно определить как свертку углового размера неискаженного поля зрения и поля зрения через экран в приближении плоской волны для отверстий. Возможные предельные случаи угловой геометрии ореола можно представить в виде таблицы 1.

Таблица 1.

Гауссов пучок, ореол рассеяния от плоской волны гауссов	$\varphi_h = \sqrt{\varphi_0^2 + \varphi_{pw}^2}$	$\Delta\varphi_h = \sqrt{\Delta\varphi_0^2 + \Delta\varphi_{pw}^2}$
Геометрия пучка описывается распределением Коши, ореол рассеяния от плоской волны описывается распределением Коши	$\varphi_h = \varphi_0 + \varphi_{pw}$	$\Delta\varphi_h = \Delta\varphi_0 + \Delta\varphi_{pw}$

Здесь φ_0 – угловой размер зондирующего пучка, φ_{pw} – угловой размер ореола рассеяния от плоской волны, φ_h – угловой размер ореола от зондирующего пучка. Отметим, что угловой размер ореола обратно пропорционален диаметру отверстия.

В общем случае угловая геометрия прошедшего через рассеивающий объект пучка зависит как от угловой геометрии зондирующего пучка, так и от функции пропускания внутри рассеивающих центров. Измерив угловой размер ореола рассеяния в зависимости от размера неоднородности, можно обосновать способ нахождения углового размера ореола от плоской волны из двух представленных выше случаев.

Измерение углового размера ореола от плоской волны

Моделирование двухпозиционной схемы (ДПС) производилось смещением точечного источника в плоскости перпендикулярной оптической оси приемного канала на заданную величину (параллакс) на разных расстояниях от приемного канала [1]. Первым значением сигнала является частота срабатываний приемника, когда источник находится на оптической оси приемного канала (параллакс равен нулю). Второе значение сигнала равно частоте срабатываний приемника, когда источник смещен относительно оси на некоторое заданное расстояние (параллакс отличен от нуля). Измеряемыми величинами являются частота срабатываний приемника, когда параллакс равен нулю и отношение двух сигналов.

При $z=29$ м в качестве параллакса выбрано значение $z\varphi=27$ мм [1]. Затем проделана локальная калибровка ДПС. На рисунке 3 представлены результаты локальной калибровки по точечному источнику.

Установка рассеивающего экрана приводит к увеличению отношения сигналов для данной дистанции за счет появления ореола рассеяния [2].

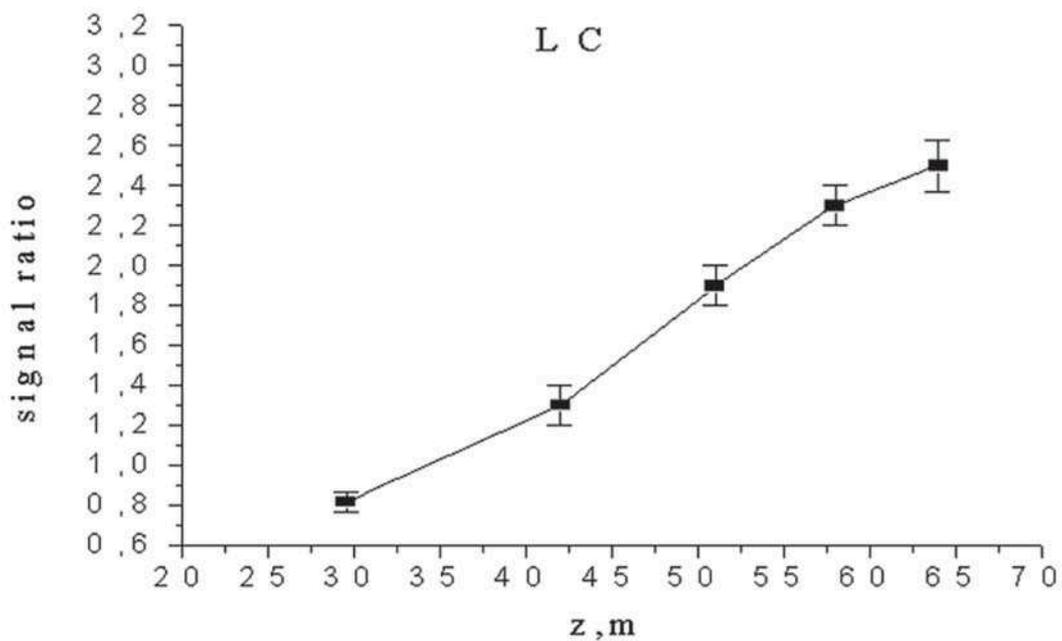


Рис. 3. Результаты локальной калибровки

В качестве рассеивающего объекта выбран случайный пропускающий экран (СПЭ) из алюминиевой фольги, фрагмент которого представлен на рисунке 4. Геометрические параметры этих экранов представлены в таблице 2.

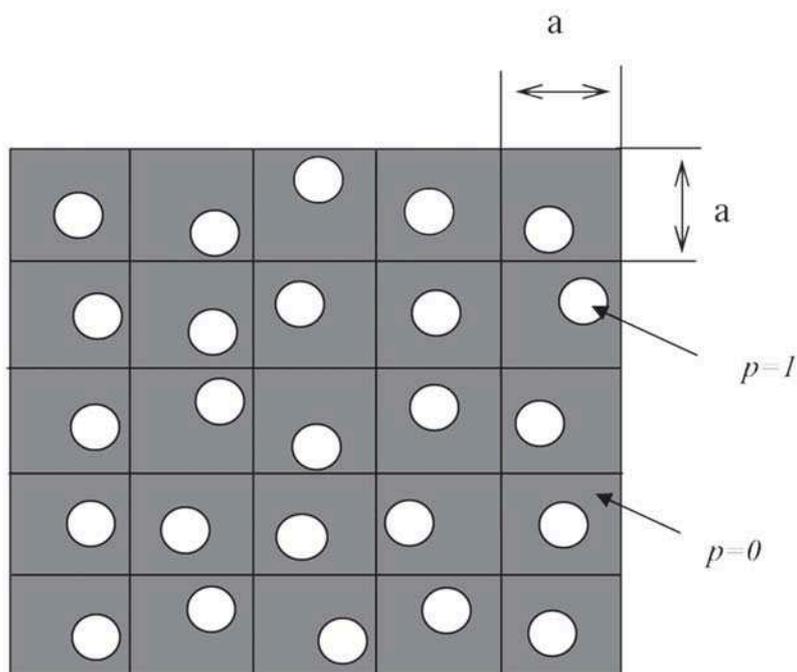


Рис. 4. Фрагмент одного из экранов с отверстиями, случайно расположенными на плоскости ячейки. Символом p обозначен коэффициент пропускания отверстия и экрана

Таблица 2.

№№	D , мм	n , отв/мм ²
1	0.5 (10%)	0.5
2	0.65 (8%)	0.5
3	0.95 (6%)	0.33
4	1.5 (9%)	0.11

После реализации локальной калибровки перед объективом приемного канала устанавливались указанные СПЭ. При этом отношение сигналов возросло. Новому отношению сигналов из рисунка 3 сопоставлялась новая дистанция z_g . Значение этой дистанции входит в выражение:

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

Здесь z – реальная дистанция между точечным источником и ДПС, p – коэффициент пропускания СПЭ. Из выражения (2) можно найти z_h . Затем коэффициент углового увеличения ореола (гало) g_h , который составит

$$g_h = z_h/z \quad (3)$$

Зависимость g_h от параметра размера отверстия D^{-1} позволяет выбрать выражение для расчета угла рассеяния от плоской волны ϕ_{pw} . Если соответствующая зависимость будет линейной, то для расчета ϕ_{pw} справедливо выражение во второй строчке таблицы 1; если зависимость квадратичная, то справедливо выражение в первой строчке таблицы 1.

На рисунке 5 представлен график зависимости g_h от параметра размера отверстия D^{-1} . Из рисунка следует, что соответствующая зависимость близка к линейной. Следовательно, использование распределения Коши для описания радиальной зависимости частоты срабатываний приемника для неискаженного пучка и соответствующей зависимости для зондирующего пучка является справедливым. Следовательно, распределением Коши можно описывать как геометрию ореола от плоской волны, так и угловой размер зондирующего пучка.

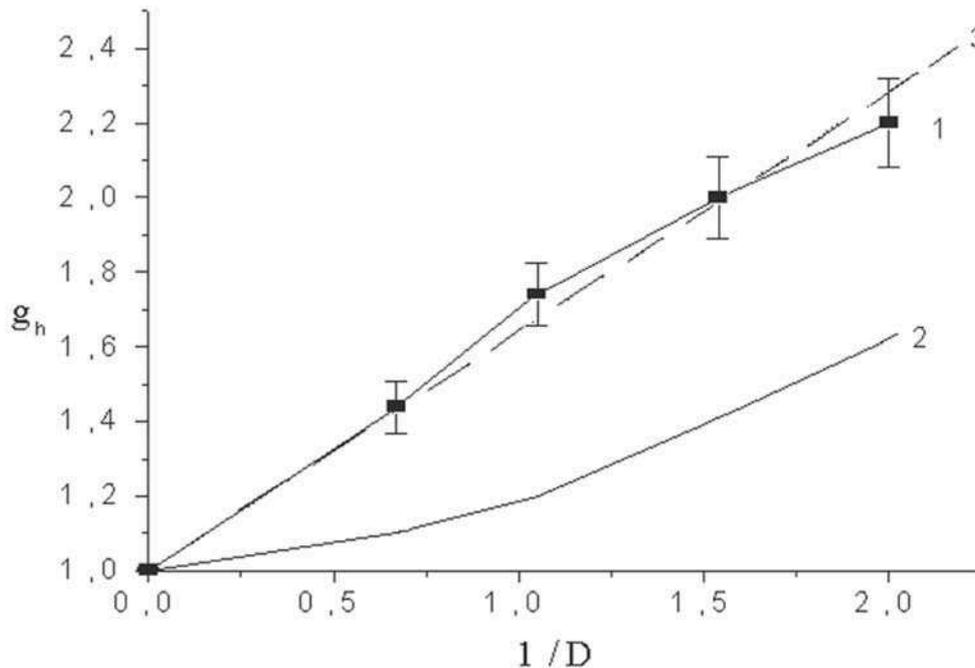


Рис. 5. Зависимость коэффициента увеличения углового размера ореола g_h от параметра размера отверстия D^{-1} . Кривая 1 – экспериментальные измерения, 2 – модель гауссова распределения для геометрии ореола, 3 – модель распределения Коши для геометрии ореола

В качестве следствия укажем, что 2-ой способ предполагает, что погрешность углового размера ореола от плоской волны определяется суммой погрешностей углового размера неискаженного пучка и углового размера ореола от зондирующего пучка.

Микрофизическая калибровка позволяет получить калибровочные коэффициенты между размером отверстия и угловым размером ореола. Если геометрия зондирующего пучка гауссова, то микрофизическая калибровка должна использовать отверстия, функция пропускания внутри которых гауссова, что может представлять технические и методические трудности. В частности, для таких отверстий представление о граничных дифракционных волнах может быть несправедливо. Наоборот, при использовании распределения Коши отверстия должны иметь резкие границы, что позволяет обоснованно использовать граничные дифракционные волны для интерпретации геометрии ореола.

Заключение

В данной работе экспериментально обосновано, что для описания геометрии ореола рассеяния от плоской волны на непрозрачном экране с отверстиями достаточно больших размеров от 0.5 до 1.5 мм следует использовать распределение Коши. В указанном диапазоне отверстий рассеянное излучение имеет узкую диаграмму направленности. Тем не менее, аппроксимация гауссовым распределением в этом случае не справедлива, поскольку зависимость углового параметра ореола рассеяния g_h от параметра размера отверстия D^{-1} линейная. Такое свойство имеет место, если и угловая геометрия неискаженного поля зрения, и угловая геометрия ореола описываются распределением Коши. Указанное распределение не имеет радиальных моментов. Следовательно, экспериментально обоснован еще один вывод дополнительно к предыдущим [3] об отсутствии необходимости использования уравнения переноса излучения для описания геометрии ореола рассеяния. Полученный вывод может быть использован при определении микроструктуры рассеивающего объекта двухпозиционными схемами зондирования без использования методов решения некорректной обратной задачи [1].

Литература

1. *Bukharin A.V.* Experimental Validation of the Scenario of the Object Microstructure Determination Using a Two-Position Lidar System: a Screen with Random Transmittance Modulation. *Physics of Wave Phenomena*, 2007, Vol. 15, No. 3, pp 1-10.
2. *Bukharin A.V.* Two-position Scheme Applied for Determination of Microphysical Properties of Random Transmitting Screen. *Physics of Vibrations*, 2002, Vol. 10, No. 3, pp 177-184.
3. *Арумов Г.П., Бухарин А.В., Ерохин Н.С.* Проблемы использования уравнения переноса излучения в задачах дистанционного зондирования рассеивающих сред // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2007. Выпуск 4. Т. 2. С. 15-19.*