

Измерение глубины распространения пучка при зондировании однородного рассеивающего слоя двухпозиционной системой. Ч. 2

Г. П. АРУМОВ¹, А. В. БУХАРИН¹, А. В. ТЮРИН¹, Ю. М. БЛИХ²

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, Россия, e-mail: tumbul@iki.rssi.ru

² Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия, e-mail: Blikh_YM@nrcki.ru

Предложена двухпозиционная схема, включающая лидар и нефелометр обратного рассеяния, для измерений геометрического формфактора. Рассмотрены параметры глубины зондирования пучка в рассеивающей среде по перекрытиям полей зрения внутри нее, являющиеся индикаторами коэффициента экстинкции и геометрии схемы. Режим нефелометра оптимален для измерений коэффициента экстинкции. Использование полного набора индикаторов позволяет оценивать точность измерений коэффициента экстинкции внутри слоя.

Ключевые слова: двухпозиционная схема, геометрический формфактор, локальная калибровка, коэффициент экстинкции, дистанционное зондирование, перфорированные экраны, обратное рассеяние.

The two-position circuit for measuring the geometric formfactor of fields of view of two receiving channels is suggested. The parameters of beam probing depth in scattering medium determined by overlaps of fields of view within it have been introduced. These parameters are indicators of the extinction coefficient and the geometry. The nephelometer mode is optimal for measuring. The use of the full set of indicators allows to estimate the accuracy of extinction coefficient measurement within the layer.

Key words: two position circuit, geometric formfactor, local calibration, extinction coefficient, remote sensing, perforated screens, back scattering.

Прогресс в разработке диодных лазеров с управляемой током запуском выходной мощностью излучения делает возможным создание лидара-нефелометра [1]. В режиме нефелометра существенно упрощается его калибровка перед измерениями аппаратной функции, имеющей форму обратного сигнала от однородной атмосферы с пренебрежимо малым коэффициентом экстинкции (КЭ). Это связано с тем, что из-за монотонного нарастания обратного сигнала можно существенно уменьшить ближнюю зону, в которой калибровка связана с большими техническими трудностями. Такое уменьшение делает возможным регистрацию сигнала от калиброванных рассеивающих поверхностей на относительно коротких трассах с минимальным использованием аттенуаторов [2]. Вследствие отсутствия пространственного разрешения вдоль трассы зондирования необходимо вводить параметры (индикаторы) глубины распространения пучка внутри слоя. Одним из таких индикаторов для идеальной схемы (ИС) зондирования является величина $\langle z^2 \rangle$ [1], которая определяется по аппаратной функции и зависит от длины строка (интервала включения приемника). При ослаблении, неоднородностях и искажениях пучка аппаратная функция также искажается и индикатор $\langle z^2 \rangle$ меняется. Для однородной атмосферы с ослаблением значение $\langle z^2 \rangle$ уменьшается. Аппаратную функцию можно измерить с помощью перфорированных экранов и затем найти зависимость $\langle z^2 \rangle$ от КЭ. На базе ИС нельзя контролировать трассовую зависимость геометрического формфактора (ГФФ) приемного и передающего каналов. Проблему контроля искажений пучка можно решить с помощью дополнительного приемного канала. Измеряя два обратных сигнала с разными трассовыми зависимостями, проводят контроль ГФФ. При

двух приемных каналах возможно введение параметра глубины зондирования по перекрытиям полей зрения. Этот индикатор также зависит от ослабления излучения в рассеивающей среде, как $\langle z^2 \rangle$ для ИС. Применение нескольких индикаторов глубины зондирования в среде позволяет оценивать точность измерений КЭ.

Калибровка. Рассмотрим идеальную двухпозиционную схему (ДПС) зондирования для лидара и нефелометра (рис. 1) [3]. Она состоит из ИС, представляющей совмещенные пе-

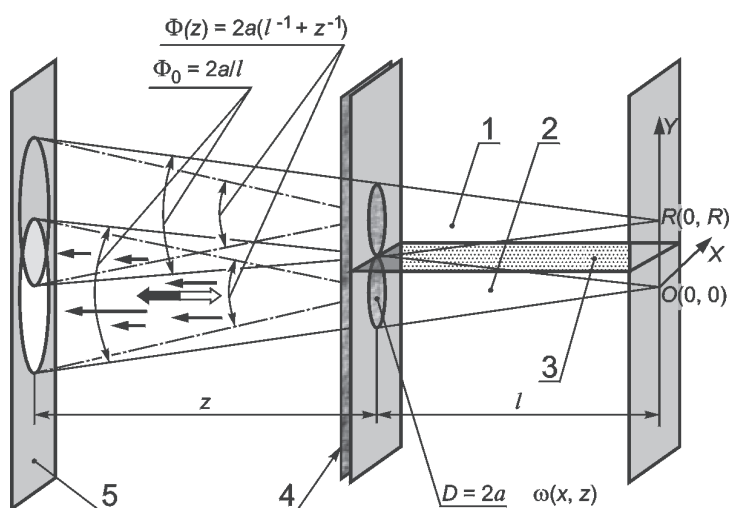


Рис. 1. Двухпозиционная схема зондирования с двумя приемными каналами ДПС:

1 — дополнительный приемный канал; 2 — идеальная схема зондирования; 3 — прозрачная перегородка $\omega(x, z)$; 4 — перфорированный экран; 5 — поверхность объекта

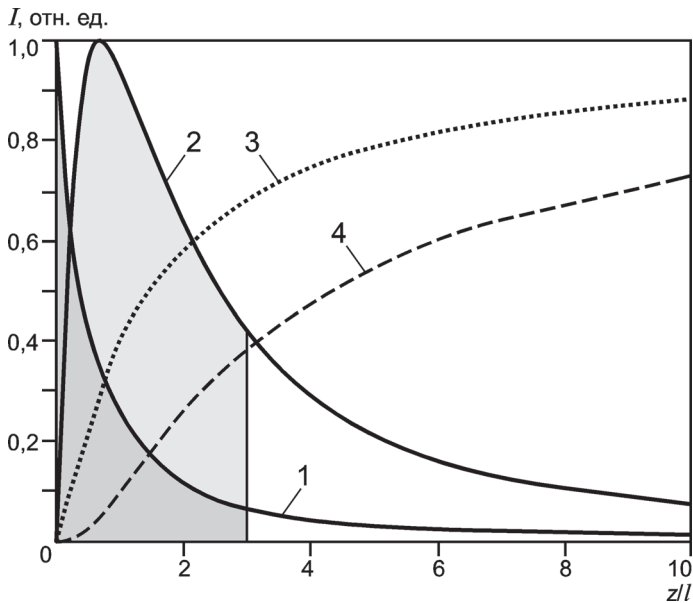


Рис. 2. Основные типы калибровок для лидара-нефелометра:
1, 2 — аппаратные функции для основного и дополнительного приемных каналов; 3 — локальная калибровка; 4 — трассовая зависимость обратного сигнала от рассеивающей поверхности для режима нефелометра

редающий и приемный каналы с коаксиальной схемой зондирования. Геометрия дополнительного приемного канала такая же, как у основного, угловой размер пучков и полей зрения совпадают. Оптическая схема дополнительного приемного канала светозащищена от ИС непрозрачной тонкой плоскостью $\omega(x, z)$ и смещена на расстояние, равное диаметру отверстия. В такой конфигурации входные апертуры приемных каналов касаются друг друга. Зондируемым инструментом с ДПС можно проводить трассовые измерения отношений сигналов, регистрируемых приемными каналами.

Режиму лидара соответствует обычный импульсный режим. Импульс очень малой длительности облучает зондируемый объект. Одновременно с этим включаются приемники, которые регистрируют временную развертку рассеянного назад излучения. Аппаратные функции приемных каналов определяют, измерив сигналы обратного рассеяния из однородной атмосферы без ослабления.

На рис. 2 представлена трассовая зависимость (кривая 1) интенсивности обратного сигнала I в точке $O(0; 0)$ (см. рис. 1), измеренного основным приемным каналом, от рассеивающей поверхности в режиме импульсного лидара. Для однородной атмосферы с пренебрежимо малым пропусканием этот график является аппаратной функцией лидара с идеальной коаксиальной схемой зондирования, в которой поле зрения приемного канала совпадает с зондирующим пучком. Также на рис. 2 показана трассовая зависимость максимальной мощности обратного сигнала, измеренного дополнительным приемным каналом (кривая 2), от рассеивающей поверхности в режиме импульсного лидара. Для однородной атмосферы с пренебрежимо малым пропусканием этот график отображает аппаратную функцию лидара с идеальной биаксиальной схемой зондирования, с разнесенными приемным и передающим каналами [4]. Временная

развертка обратного сигнала из однородной атмосферы для обоих каналов определяется заменой $z = ct/2$, где z — длина трассы, c — скорость света, t — время задержки между началом лазерного импульса и отраженным излучением лазера.

Параметр расстояния z/l выражен через масштаб l , определяемый как отношение диаметра входной апертуры a к угловому размеру поля зрения. Если апертуру уменьшить в 2 раза, то параметр l не изменится, так как одновременно в 2 раза уменьшается угловой размер пучка. Для дополнительного приемного канала на небольших дистанциях $z < l$ сигнал возрастает из-за увеличения перекрытия поля зрения для дополнительного приемного канала с зондирующим пучком, затем на больших трассах $z \gg l$, когда перекрытие практически постоянно, сигнал с расстоянием убывает по квадратичному закону.

Использование перфорированных экранов позволяет находить аппаратную функцию, поскольку такие экраны дают стандартный метод определения углового размера поля зрения или зондирующего пучка. Перфорированный экран — непрозрачная тонкая поверхность с отверстиями, расположенными случайно и равномерно вдоль всей ее площади. С помощью такого экрана можно воспроизвести любое перекрытие полей зрения с зондирующим пучком практически на любой дистанции [5].

Важным типом калибровки является нахождение трассовой зависимости отношения двух сигналов или локальная калибровка (ЛК) [3]. На рис. 2 в приближении геометрической оптики эта зависимость представлена кривой 3.

Режим нефелометра [1] создается модуляцией мощности излучения лазера с линейным убыванием в течение времени τ . В момент окончания импульса зондирующего излучения на время τ открывается приемник. Сигналом обратного рассеяния является суммарное количество сигнальных фотоотсчетов во временном промежутке $0 - \tau$. При такой циклограмме работы проводится зондирование слоя $0 \leq z \leq c\tau/2 = L$. Режиму нефелометра соответствует минимальный размер ближней зоны. Трассовая зависимость сигнала от ориентированной рассеивающей поверхности, измеренная основным приемным каналом, представлена на рис. 2 кривой 4.

Для режима нефелометра ЛК можно провести по трассовой зависимости отношения сигналов от рассеивающей поверхности в диапазоне от 0 до $L = c\tau/2$. Эти измерения не представляют больших технических трудностей, так как требование о сохранении ориентации зондирующего пучка и рассеивающей поверхности является необязательным. Поэтому для таких измерений можно использовать плоские поверхности любых топографических объектов (здание, рекламные щиты, плакаты и др.).

Следует отметить методическое разнообразие калибровок для ДПС. В [1] рассмотрен способ калибровки ИС для нахождения аппаратной функции, являющейся трассовой зависимостью, обратно пропорциональной площади пятна в поле зрения приемного канала. Ключевой параметр для измерений размера пятна — коэффициент пропускания экрана для точечного источника. Для ДПС таким параметром служит дистанция, измеряемая по ЛК. При использовании перфорированных экранов для ИС возможны случаи, когда геометрия пятна искажается неравномерно, что бывает при измерениях с ДПС, но не наблюдается для ИС.

Измерения КЭ. Возможность измерения КЭ основана на различиях ГФФ для основного и дополнительного приемных каналов. При зондировании рассеивающей среды ключевым параметром является отношение двух сигналов как в режиме лидара, так и нефелометра. Под измеряемым обратным сигналом для обоих приемных каналов в режиме лидара $N_n(0; \tau)$ подразумевается суммарное количество фотоотсчетов внутри строба длительностью τ . Обратным сигналом для обоих каналов в режиме нефелометра является количество фотоотсчетов $N_n(\tau; 2\tau)$ для интервала $\tau-2\tau$. В зависимости от режима работы отношения сигналов можно сопоставить некото-

рое расстояние $z_{\text{ЛК}}$ для нефелометра и $z_{\text{ЛК}}^{\text{Л}}$ для лидара из результатов ЛК (см. рис. 2, кривая 3). В [1] показано, что сигнал от рассеивающей поверхности для основного приемного канала обратно пропорционален площади сечения пучка. Для дополнительного приемного канала сигнал от рассеивающей поверхности будет обратно пропорционален площади сечения пучка и коэффициенту, описывающему перекрытие поля зрения приемного канала пучком [6]. Для ДПС на рис. 1 это отношение представляет трассовую зависимость перекрытий полей зрения приемных каналов или ЛК. Отношению сигналов для среды всегда можно поставить в соответствие отношение сигналов от рассеивающей поверхности на расстоянии $z_{\text{ЛК}}$, которое уменьшается

с увеличением КЭ. Индикатор $z_{\text{ЛК}}^{\text{Л}}$ имеет наглядную интерпретацию как расстояние до эквивалентного перекрытия полей зрения с зондирующим пучком внутри рассеивающей среды. Отношение сигналов в режиме лидара будет близко к перекрытию полей зрения внутри среды, освещенность которой вдоль трассы квадратично убывает. Для режима нефелометра отношение сигналов будет характерно для перекрытия полей зрения внутри среды, однородно освещенной вдоль трассы.

Такая интерпретация позволяет провести моделирование зависимости $z_{\text{ЛК}}$ от КЭ в приближении геометрической оптики. Для трассовой зависимости сигнала обратного рассеяния и углового размера пучка можно использовать формулы из [1]. Для моделирования выбран размер строба $\tau = 2L/c$ с эквивалентом пространственной длины $L = 3l$, исходя из того, что зависимость для ЛК имеет большой угол наклона. На рис. 2 показана область зондирования для основного (темный фон под кривой 1) и дополнительного приемных каналов (светлый фон под кривой 2). Это делает наиболее точными измерения ЛК в данном диапазоне расстояний. Зависимости $z_{\text{ЛК}}/l$ от параметра αl при $\tau = 6l/c$ в режиме лидара (линия 1) и нефелометра (линия 2) представлены на рис. 3, а: αl — безразмерный параметр, α — КЭ. Из рис. 3 следует, что ДПС может быть настроена на измерение заданного КЭ. Для примера выберем оптимальное значение $z_{\text{ЛК}}(\alpha_{\text{опт}} l)$:

$$z_{\text{ЛК}}(\alpha_{\text{опт}} l) = 0,5[z_{\text{ЛК}}(\alpha l = 0) + z_{\text{ЛК}}(\alpha l = 1)], \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{опт}}$ — оптимальный КЭ; $z_{\text{ЛК}}(\alpha l = 0)$, $z_{\text{ЛК}}(\alpha l = 1)$ — индикаторы глубины зондирования в среде без ослабления и с ослаблением. По сути $z_{\text{ЛК}}(\alpha l = 0)$ — индикатор аппаратной функ-

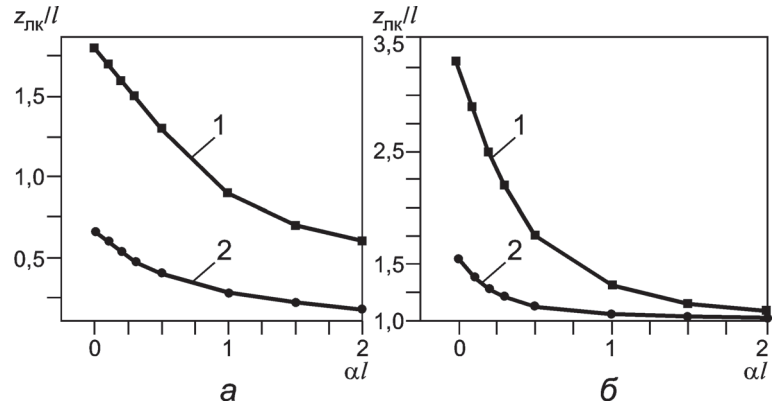


Рис. 3. Зависимость параметра глубины зондирования $z_{\text{ЛК}}/l$ от безразмерного коэффициента экстинкции αl в отсутствие параллакса (а) и при его наличии (б):

1, 2 — режимы нефелометра и лидара, соответственно

ции, который зависит только от геометрии ДПС и длины строба, но не зависит от параметров атмосферы. Основные результаты моделирования представлены в таблице.

Глубина зондирования $z_{\text{ЛК}}$ для лидара-нефелометра при разных параллаксах δ и индикаторах αl

Режим	Длительность строба τ	Глубина зондирования $z_{\text{ЛК}}$ для разных параллаксов			
		$\delta = 0$		$\delta = a$	
		$\alpha l = 0$	$\alpha l = 1$	$\alpha l = 0$	$\alpha l = 1$
Лидара	6л/с 12л/с	0,66/ 0,85/	0,28/ 0,3/	1,4/ 1,54/	1,03/ 1,02/
Нефелометра	6л/с 12л/с	1,8/ 3,2/	0,9/ 0,86/	1,9/ 3,3/	1,28/ 1,3/

Из графика на рис. 3, а и таблицы для режима нефелометра находим $z_{\text{ЛК}}(\alpha l = 0) = 1,8l$, $z_{\text{ЛК}}(\alpha l = 1) = 0,9l$, $\alpha_{\text{опт}} l = 0,4$, что соответствует оптимальному значению КЭ $\alpha_{\text{опт}} \approx 0,4l^{-1}$. Из (1) получаем $z_{\text{ЛК}}(\alpha_{\text{опт}} l) = 1,35l$. Соответствующие значения для режима лидара $z_{\text{ЛК}}(\alpha l = 0) = 0,66l$, $z_{\text{ЛК}}(\alpha l = 1) = 0,28l$, $\alpha_{\text{опт}} l = 0,3$, $\alpha_{\text{опт}} \approx 0,3l^{-1}$. Значения $\alpha_{\text{опт}}$ для обоих случаев практически одинаковы. Однако для режима лидара характерен меньший диапазон изменения $\Delta z_{\text{ЛК}} = 0,66l - 0,28l = 0,38l$. Параметр $z_{\text{ЛК}} = 0,66l$ находится внутри ближней зоны, в которой происходит формирование полей зрения и угловой геометрии пучка. Соответствующий диапазон для нефелометра составляет $\Delta z_{\text{ЛК}} = 1,8l - 0,9l = 0,9l$ и находится вне ближней зоны лидара. Отметим существенно меньший угол наклона для оптимальной точки $z_{\text{ЛК}}(\alpha l)$ в режиме лидара, что приводит к понижению точности измерения КЭ.

Для рассмотренной модели расстояние между оптическими осями D (см. рис. 1) равно диаметру апертуры приемного (передающего) канала a , тогда апертуры приемных каналов касаются друг друга. Полагаем, что для этой схемы параллакс $\delta = 0$. Когда $D > a$, апертуры приемных каналов в непосредственной близости от прибора не касаются друг друга, а параллакс $\delta = D - a$. Примем $\delta = D - a = a$, что соответствует расстоянию $D = 2a$. При параллаксе $\delta = a$ можно ожидать увеличения протяженности зондирования $z_{\text{ЛК}}$ для однородной атмосферы без ослабления. Если это справедливо, то повысится чувствительность измерения КЭ.

При возрастании параллакса диапазон изменений параметра $z_{\text{ЛК}}(\alpha l)$ не увеличивается (см. таблицу). В режиме лидара $\Delta z_{\text{ЛК}} = 0,38l$ для $\delta = 0$ и $\Delta z_{\text{ЛК}} = 0,37l$ для $\delta = a$. В режиме нефелометра диапазон изменений $z_{\text{ЛК}}(\alpha l)$ существенно уменьшается: $\Delta z_{\text{ЛК}} = 0,9l$ для $\delta = 0$ и $\Delta z_{\text{ЛК}} = 0,62l$ для $\delta = a$, поэтому представляет интерес увеличение длительности строга в 2 раза (до $12l/c$).

На рис. 3, б приведены результаты моделирования зависимости $z_{\text{ЛК}}/l$ от безразмерного коэффициента экстинкции αl для параллакса $\delta = a$ и длительности строга $\tau = 12l/c$, что соответствует зондируемому слою толщиной $6l$.

Из таблицы для режима нефелометра находим $z_{\text{ЛК}}(\alpha l = 0) = 3,3l$, $z_{\text{ЛК}}(\alpha l = 1) = 1,3l$; согласно (1) $z_{\text{ЛК}}(\alpha_{\text{опт}} l) = 2,35l$. Из графика на рис. 3, б определяем $\alpha_{\text{опт}} l = 0,25$, $\alpha_{\text{опт}} \approx 0,25l^{-1}$. Для режима лидара: $z_{\text{ЛК}}(\alpha l = 0) = 1,54l$, $z_{\text{ЛК}}(\alpha l = 1) = 1,02l$, $z_{\text{ЛК}}(\alpha_{\text{опт}} l) = 1,28l$, $\alpha_{\text{опт}} l = 0,2$, $\alpha_{\text{опт}} \approx 0,2l^{-1}$ — получаем существенно меньший диапазон изменения $\Delta z_{\text{ЛК}} = 0,52l$, чем для нефелометра, у которого $\Delta z_{\text{ЛК}} = 2l$, и также меньший наклон зависимости $z_{\text{ЛК}}(\alpha l)$. Следовательно, в режиме нефелометра увеличивается чувствительность измерений КЭ.

Рассмотрим случай, когда одновременно с ростом длительности строга τ увеличивается апертура приемного канала. Нетрудно показать, что если одновременно с ростом τ , например в 2 раза, во столько же увеличить параметр l , то зависимость отношения сигналов от параметра расстояния z/l не изменится для обоих режимов. Это приведет к повышению в 2 раза чувствительности измерения КЭ.

Для ДПС измерение КЭ основано на применении перекрытий полей зрения или ГФФ. Для ИС используется трассовая зависимость убывания обратного сигнала. Поскольку применение ГФФ для ИС невозможно, то измерения КЭ для идеальной и двухпозиционной схем являются независимыми и могут быть использованы для оценки точности измеренного коэффициента.

Параметр $z_{\text{ЛК}}^H$ представляет самостоятельный интерес как независимый, характеризующий глубину зондирования внутри слоя.

Пример. Пусть оптическая толщина слоя $3\alpha l = 0,6$, что соответствует безразмерному КЭ $\alpha l = 0,2$. Из графика на рис. 3, а получаем $z_{\text{ЛК}}^H = 1,7l$, для однородной атмосферы без ослаб-

ления $z_{\text{ЛК}}^H = 1,8l$. Индикаторы $z_{\text{ЛК}}^H$, $z_{\text{ЛК}}^H$ отличаются незначительно, следовательно, нефелометр настроен неоптимально. Для параллакса $\delta = a$ из графиков на рис. 3, б находим $z_{\text{ЛК}}^H = 2,9l$, $z_{\text{ЛК}}^H = 3,3l$. Эта конфигурация ДПС предпочтительнее для измерений КЭ, так как $z_{\text{ЛК}}^H$, $z_{\text{ЛК}}^H$ существенно отличаются. Из примера видно удобство использования параметра $z_{\text{ЛК}}$ как геометрической характеристики лидара-нефелометра, так и для измерений КЭ.

Заключение. Индикаторы глубины распространения пучка в рассеивающей среде могут быть введены для лидара-нефелометра с ИС и ДПС. Для ИС индикатор глубины $\langle z^2 \rangle$ сильно зависит от длительности строга и формы аппаратной функции. В пределе открытого строга аппаратная функция близка к z^{-2} и индикатор $\langle z^2 \rangle$ расходится. Для ДПС индикаторы глубины зондирования пучка в режиме лидара $z_{\text{ЛК}}^H$

и нефелометра $z_{\text{ЛК}}^H$ зависят от перекрытий полей зрения.

Для открытого строга $z_{\text{ЛК}}^H \approx l$, $z_{\text{ЛК}}^H$ стремится к бесконечности. Поскольку индикатор глубины зондирования нельзя ввести для ИС по ГФФ, то $z_{\text{ЛК}}^H$, $z_{\text{ЛК}}^H$ независимы от $\langle z^2 \rangle$. В ИС обратный сигнал уменьшается по квадратичному закону с дистанцией, поэтому больший вклад в измерение КЭ для $\langle z^2 \rangle$, $z_{\text{ЛК}}^H$ дают ближние слои, а для $z_{\text{ЛК}}^H$ — дальние, так как сигнал монотонно возрастает с увеличением расстояния до зондируемого слоя. Несмотря на то, что определение параметра $z_{\text{ЛК}}$ по ГФФ требует установки второго приемного канала, указанная схема для лидара-нефелометра с ДПС дает дополнительную информацию об угловом искажении ГФФ.

В режиме работы лидара индикатор аппаратной функции находится внутри ближней зоны и составляет $z_{\text{ЛК}}^H = 0,66l$, а в режиме нефелометра — вне ближней зоны и равен $z_{\text{ЛК}}^H = 1,8l$. Оптимальное значение $\alpha_{\text{опт}}$ находится в диапазоне $0,3l^{-1} — 0,4l^{-1}$ для обоих режимов работы. Однако для нефелометра характерна большая точность измерений КЭ.

Рассмотрена задача измерений КЭ нефелометром с параллаксом. Показано, что при параллаксе чувствительность нефелометра к измерению повышается до $0,25l^{-1}$. При этом режим нефелометра предпочтительнее, чем режим лидара, и, следовательно, является оптимальным для измерений КЭ. Наглядно показана возможность настройки геометрии инструмента на измерения заданного КЭ на открытых трассах, для чего нужна калибровка по восстановлению аппаратной функции с использованием перфорированных экранов.

Л и т е р а т у р а

1. Арумов Г. П., Бухарин А. В., Блих Ю. М. Метод определения аппаратной функции для лидара-нефелометра упругого рассеяния с коаксиальной схемой зондирования. Ч. 1 // Измерительная техника. 2015. № 4. С. 28—32.
2. Michael J. Kavaya, Robert T. Menzies, David A. Haner, Uri P. Oppenheim, Pierre H. Flamant. Target reflectance measurements for calibration of lidar atmospheric backscatter data // Appl. Opt. 1983. V. 22. N. 17. P. 2619—2628.
3. Bukharin A. V. Method for measurement of beam lateral distortions with two-position sensing schemes // Phys. Vibrations. 2001. V. 9. N. 4. P. 246—255.
4. Measures R. M. Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications. N. Y.: Wiley, 1983.
5. Арумов Г. П., Бухарин А. В., Тюрин А. В. Использование статистически неоднородных экранов в задаче калибровки лидара по параметрам изображений частиц для приземного слоя атмосферы // Измерительная техника. 2014. № 3.
6. Арумов Г. П., Бухарин А. В., Ерохин Н. С. Метод определения микрофизических параметров рассеивающих сред двухпозиционными схемами зондирования // ИКИ РАН. М., 2003. Препринт № Пр-2095.

Дата принятия 24.03.2015 г.