

# **Сопоставление конфигураций лидаров упругого рассеяния для использования минимального набора калибровочных инструментов**

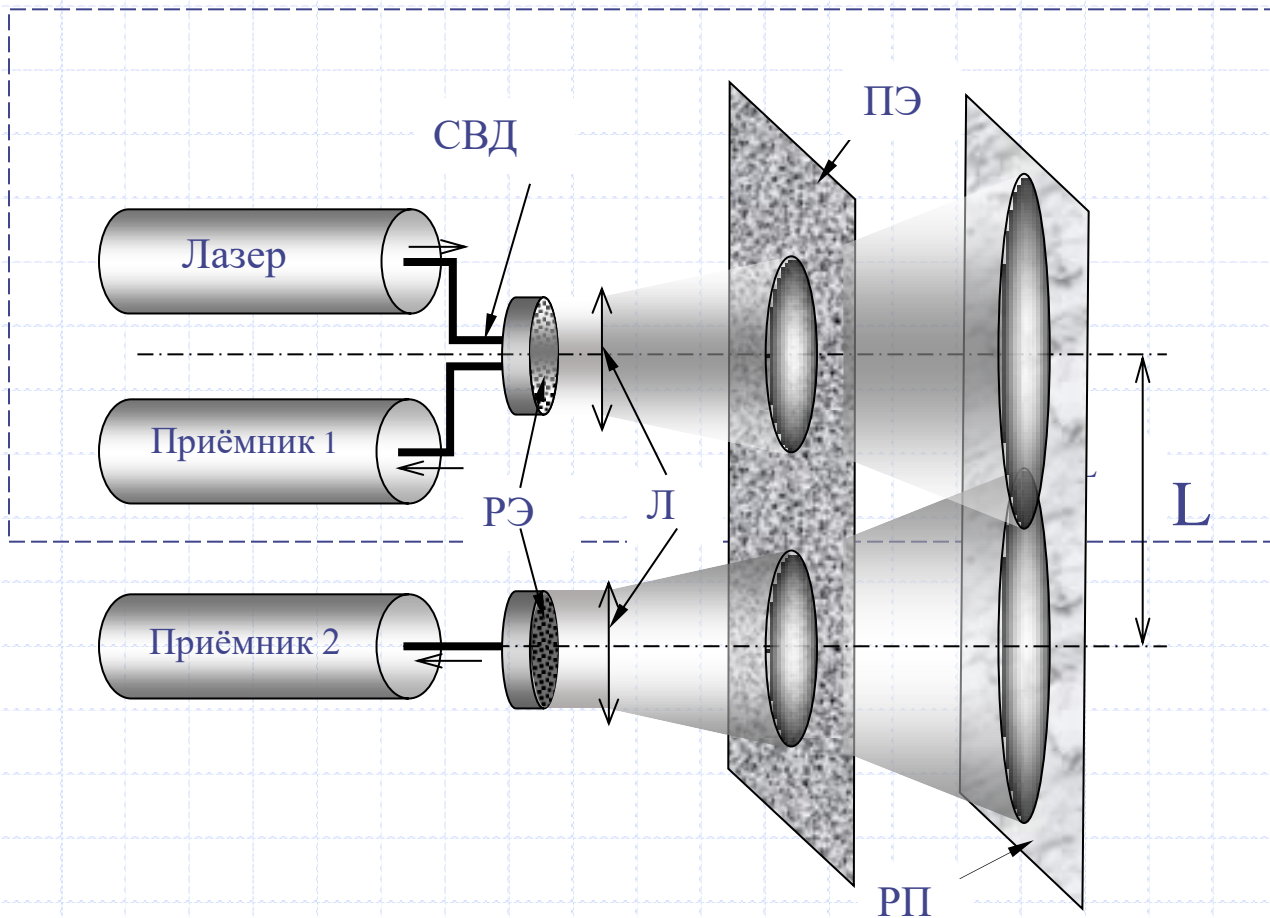
**Арумов Г. П., Бухарин А. В., Тюрин А. В.**

***Институт космических исследований РАН,***

***e-mail: [tumbul@iki.rssi.ru](mailto:tumbul@iki.rssi.ru)***

◆ Методы с применением многоволнового зондирования не применимы для исследования приземного слоя атмосферы из-за наличия в этом слое частиц с различными оптическими и физическими свойствами. Альтернативный подход основан на применении модели эквивалентного слоя, состоящего из монодисперсных частиц. Индикатором эквивалентного сечения частиц внутри слоя служит угловой размер ореола вокруг пучка. Угловой размер ореола можно измерить оптимальными **ДвухПозиционными Схемами (ДПС)** по изменениям **Геометрического Форм Фактора (ГФФ)** полей зрения и зондирующего пучка. Минимальным набором калибровочных инструментов для лидаров с оптимальными схемами являются перфорированные экраны и отражающие сферы.

# Иллюстрация оптимальной двухпозиционной схемы зондирования



# Характеристики лазера и приёмников

- ◆ Коаксиальная схема зондирования с равными угловыми размерами пучка и поля зрения (выделенная штриховыми линиями верхняя часть схемы на предыдущем слайде) 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. Излучение на выходе делителя попадает на рассеивающий элемент (РЭ). Использование этого элемента не является необходимым. Однако этот элемент может сформировать выходное излучение и поля зрения с заданным коническим углом. Этот угол определяется фокусным расстоянием линз (Л) и диаметром рассеивающего элемента. Кроме того, диаметр РЭ задаёт угловой размер выходного пучка и поле зрения приёмного канала.
- ◆ 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 характерно высокое значение времени восстановления до 20 мкс.
- ◆ Для приёмников фирмы Thorlabs характерны следующие параметры; низкая скорость темнового счета до 150 Гц, активная область детектора имеет диаметр 50 мкм. Квантовая эффективность в диапазоне от 800 нм до 900 нм составляет от 7% (800 нм) до 3% (900 нм).

## Измерение ГФФ и аппаратной функции лидарами с ДПС

Оптимальная ДПС	Обычная ДПС
❖ ГФФ основного канала 0.25	❖ Для основного канала ГФФ=1
❖ По изменению ГФФ можно определять угловое увеличение <b>полей зрения (ПЗ)</b> и <b>угловых размеров пучка (УРП)</b>	❖ 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 <b>перфорированных экранов (ПЭ)</b> на трассах с фиксированной дальностью	❖ Аппаратная функция не может быть измерена с помощью ПЭ

## Сравнение способов калибровки лидаров с ДПС

Калибровка ДПС	Калибровка оптимальных ДПС
<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Существенная зависимость от угловой диаграммы обратного рассеяния. Трудности учёта отклонений от стандартных угловых диаграмм рассеяния (например, Ламбертовой).</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Коэффициент отражения от отражающей сферы с радиусом <math>R</math> равен <math>R^2/4</math></li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Не зависит от геометрического фактора приёмного и передающего каналов.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Существенная зависимость от ГФФ. Но для коаксиальной схемы на рис. 1 ГФФ=0.25, а для отражающей сферы ГФФ=1</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Использование аттенуаторов для измерения обратного сигнала от рассеивающей поверхности (обратный сигнал из атмосферы на несколько порядков меньше обратного сигнала от рассеивающей поверхности).</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Использование сфер позволяет детектировать обратный сигнал, сравнимый по величине с сигналом обратного рассеяния из атмосферы.</li></ul>

# Пример использования отражающих сфер

◆ Для оптического диапазона Коэффициент Обратного Рассеяния (КОР) из молекулярной атмосферы составляет величину на уровне  $10^{-7} \text{ (м стр)}^{-1}$  (Measures, 1985). Эту величину можно смоделировать находящейся в единице объёма отражающей сферой диаметром  $1.3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Сфере диаметром 2 см соответствует КОР на уровне  $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ (м стр)}^{-1}$ . 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.

# Сравнение среднего и эквивалентного значения поперечного сечения частиц

Среднее сечение	Эквивалентное сечение
<p>Среднее значение сечения зависит от нормировки. Ограниченная применимость к несферическим частицам (для сечений в виде изогнутых полос и нитей метод нормировки неприменим).</p>	<p>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.))</p>
<p>Может быть получено только с использованием контактных методов (снимки, забор проб, и т. д. )</p>	<p>Может быть измерено по угловой трансформации пучка в рассеивающей среде (угловой размер ореола вокруг пучка), 2d и 3d экранам. При распространении пучка в рассеивающей среде индикатором размера частиц может являться угловой размер ореола при прямом рассеянии</p>
<p>Высокая чувствительность к мелкодисперсным фракциям</p>	<p>Максимальная чувствительность к крупнодисперсным фракциям</p>



# Заключение

Рассмотрена оптимальная двухпозиционная схема, включающая в себя коаксиальный приёмопередающий канал и дополнительный приёмный канал. Угловые размеры зондирующего пучка и полей зрения приёмных каналов совпадают. Для такой схемы существуют способы определения аппаратной функции для коаксиального канала и трассовой зависимости ГФФ основного и дополнительного приёмных каналов посредством перфорированных экранов. Для измерения КОР коаксиальный канал может быть откалиброван посредством отражающих сфер. Для интерпретации КОР обоснованы схемы контактных измерений на отдельных частицах характерные для лидарных измерений. Это позволяет применять основной измеряемый коэффициент (КОР) для определения концентрации эквивалентных частиц. Применение концепции эквивалентной среды позволяет использовать максимально упрощённый метод для микрофизической интерпретации базовых коэффициентов для лидара упругого рассеяния.

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

# Литература

- ◆ 1. *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.
- ◆ 2. *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. P. 877–882. DOI: 10.1070/QEL16009.
- ◆ 3. *Chemyakin E., Burton S., Kolgotin A., Müller D., Hostetler C., and Ferrare R.* Retrieval of aerosol parameters from multiwavelength lidar: investigation of the underlying inverse mathematical problem // **Applied Optics**. 2016. Vol. 55. Issue 9. P. 2188-2202. <https://doi.org/10.1364/AO.55.002188>.
- ◆ 4. *Measures R. M.* Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications. New York: Wiley. 1983. 912p.
- ◆ 5. *Mishchenko M. I.* Electromagnetic scattering by nonspherical particles: A tutorial review // Journal Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2009. Vol. 110. No. 11, P. 808–832. [doi.org/10.1016/j.jqsrt.2008.12.005](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2008.12.005).
- ◆ 6. *Veselovskii I., Kolgotin A., Griaznov V., Muller 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. № 18. P. 3685-3699. [doi.org/10.1364/AO.41.003685](https://doi.org/10.1364/AO.41.003685).
- ◆ 7. *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](https://doi.org/10.5194/amt-8-4111-2015). 2015. Vol. 8. P. 4111–4122. doi:10.5194/amt-8-4111-2015. [doi.org/10.5194/amt-8-4111-2015](https://doi.org/10.5194/amt-8-4111-2015).
- ◆ 8. *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** // 2019. Appl. Opt. Vol. 58, P. 8075-8082. [doi.org/10.1364/AO.58.008075](https://doi.org/10.1364/AO.58.008075).