

**Миниатюризация лидаров для создания режима  
зондирования малых объёмов при постоянном  
значении сигнала обратного рассеяния**

**Г. П. Арумов, А. В. Бухарин**

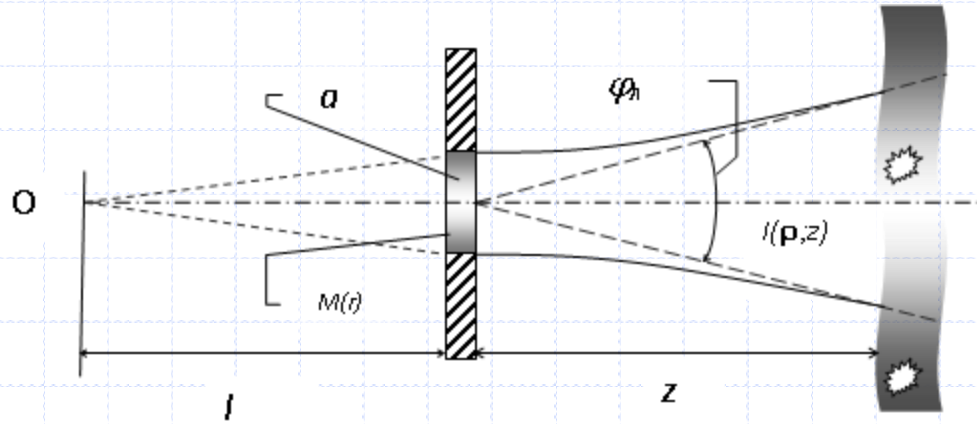
***Институт космических исследований РАН,  
Москва, Россия***

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

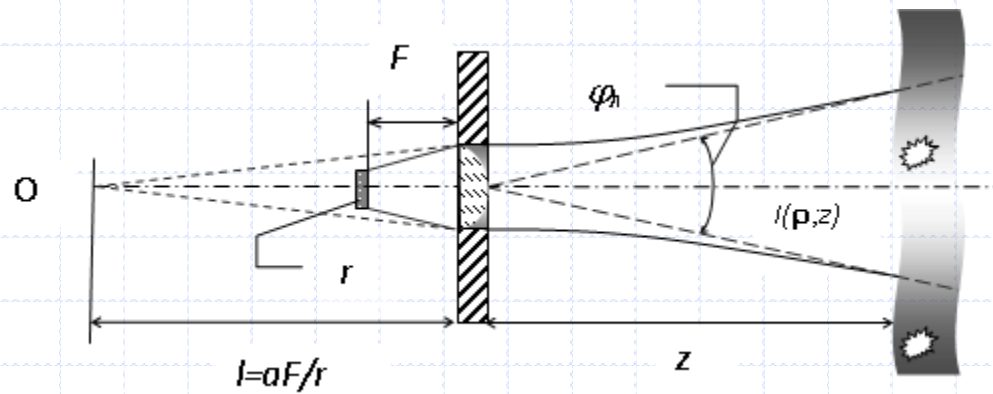
◆ Микролидар позволяет регистрировать обратный сигнал из малых объемов атмосферы на предельно коротких трассах до нескольких сантиметров. Регистрируемый сигнал для микролидара состоит из одиночных импульсов рассеивающих частиц и постоянной составляющей, которая является результатом молекулярного рассеяния. По схеме микролидара может быть изготовлен лидар в увеличенном масштабе (минилидар). Для минилидара, в отличие от микролидара, обратный сигнал представляет собой непрерывное излучение, образованное рассеянием на молекулах и частицах от слоя размером от нескольких метров до нескольких десятков метров. Обе схемы характеризуются одинаковыми средними значениями сигналов обратного рассеяния. Постоянная составляющая сигнала обратного рассеяния на молекулах в случае микролидара может быть сопоставлена табличному значению коэффициента обратного рассеяния с применением оптической модели атмосферы. Это позволяет определить аэрозольную составляющую коэффициента обратного рассеяния. Микролидар можно использовать для интерпретации сигнала обратного рассеяния, измеренного минилидаром. Данный подход можно использовать для калибровки лидаров упругого рассеяния с неоптимальной конфигурацией. Обратное рассеяние отдельными частицами может использоваться для построения модели эквивалентной среды, состоящей из монодисперсных частиц. Использование модели эквивалентной среды позволяет выявлять пространственную и временную динамику аэрозольного состояния атмосферы по минимальному набору микрофизических величин.

# Иллюстрация оптимальной коаксиальной схемы лидара. а – оптимальная схема без линзы, б – оптимальная схема с линзой

А.



Б.



# Сигнал обратного рассеяния из атмосферы

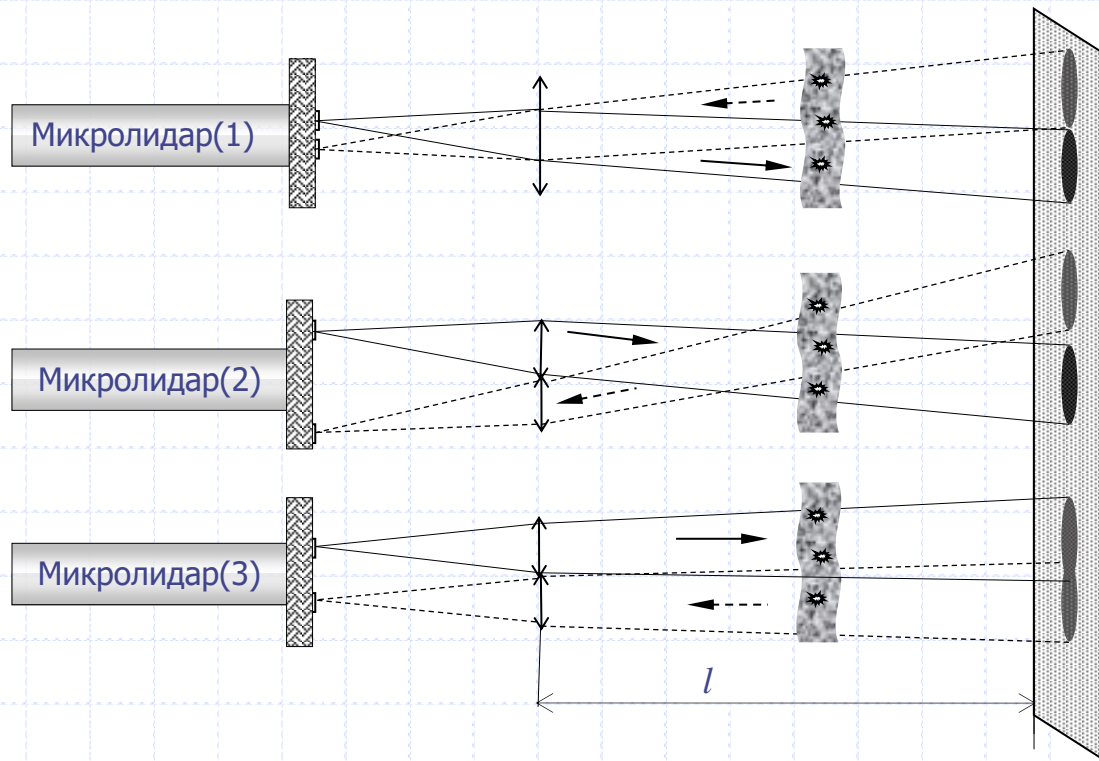
Суммарная интенсивность обратного сигнала из однородной атмосферы с пренебрежимо малым коэффициентом ослабления для схемы А определяется суммированием (интегрированием) по  $z$  и составит

$$I(\beta) = \frac{\pi a^2}{l} I_0 \beta_0$$

Суммарная интенсивность обратного сигнала из однородной атмосферы с пренебрежимо малым коэффициентом ослабления для схемы Б составит

$$I(\beta) = \frac{\pi a r}{F} I_0 \beta_0$$

Иллюстрация основных некоаксиальных схем зондирования для Микролидара (МКЛ). Микролидар(1) представляет собой схему, в которой поле зрения и зондирующий пучок формируются одной линзой (объективом) и пересекаются в некотором объёме внутри ближней зоны  $l$ . Микролидар(2) представляет собой схему, в которой поле зрения и зондирующий пучок пересекаются в некотором объёме, и формируются двумя отверстиями (Микролидары (1) и (2) - бистатические схемы). Микролидар(3) представляет собой микролидар аналогичный варианту (2), но с параллельными оптическими осями (биаксиальная схема)



## Особенности регистрации обратных сигналов из атмосферы некоаксиальными схемами

- ◆ Для коаксиальной схемы зондирования от слоя толщиной от 0 до  $l$  в приёмный канал попадает половина мощности обратного рассеяния из всей среды. Тогда в схеме, для которой поле зрения и угловой размер пучка формируются одним отверстием, а продольный размер области пересечения оптических осей вблизи каналов приёмника и передатчика составляет величину порядка  $l$  (Микролидар(1)), обратный сигнал сопоставим с сигналом обратного рассеяния для коаксиальной схемы зондирования. Такие же выводы справедливы для схем зондирования с разнесёнными каналами приёмника и передатчика, для которых продольный размер области пересечения поля зрения и зондирующего пучка имеет размер порядка  $l$  и находится внутри ближней зоны (Микролидар(2)). Таким образом для указанных выше схем обратные сигналы из атмосферы будут сопоставимы друг с другом. Экспериментально эти выводы можно наглядно проиллюстрировать на примерах миниатюрных лидаров с диодным лазером.
- ◆ Для бистатических схем (Микролидар(1) и Микролидар(2)) поле зрения и зондирующий пучок пересекаются в некотором объёме. Если этот объём находится на некотором удалении и его продольный размер меньше расстояния до микролидара, или внутри ближней зоны, то на этой основе может быть создан микролидар для определения микроструктуры среды, так как сигнал обратного рассеяния от частиц практически не зависит от расстояния до микролидара. Рассмотрим несколько примеров, иллюстрирующих особенности регистрации обратного сигнала микролидаром и минилидаром.

# Пример 1.

- ◆ Пусть микролидар с коаксиальной схемой имеет радиус приёмной (передающей) площадки  $r=50$  мкм, радиус входной апертуры  $a=1$  мм, фокусное расстояние объектива с микролинзой  $F=3$  мм. Тогда размер ближней зоны  $l$  составит 6 см. Для частицы, находящейся в ближней зоне приёмного канала, принимаемый сигнал обратного рассеяния формируется только небольшой частью входной апертуры. Сигнал обратного рассеяния от частицы, находящейся на больших расстояниях внутри ближней зоны, регистрируется большей частью входной апертуры. Следовательно, пропорциональные амплитуде интенсивности обратных сигналов от монодисперсных частиц, находящихся внутри ближней зоны, приблизительно одинаковы. Зондируемый объём внутри ближней зоны  $l$  оценим, как  $V= \pi a^2 l \approx 188 \text{ мм}^3 \approx 0,2 \text{ см}^3$ .
- ◆ В предположении, что в этом объёме находится только одна частица, можно оценить соответствующую концентрацию, как  $5 \cdot 10^3$  частиц на литр воздуха. Отметим, что в средних широтах средняя концентрация пыли на высотах 200 м и 500 м составляет 6500 и 4000 соответственно. В приземном слое атмосферы концентрация пыли может существенно превышать  $10^4$  частиц на 1 л воздуха. Эти примеры иллюстрируют возможность регистрации микролидаром отдельных частиц. Реализовать такой режим измерений позволяет микролидар с бистатической схемой зондирования (Микролидар(1), Микролидар(2)). Приведённый пример иллюстрирует предельный режим работы микролидара в режиме нефелометра.

## Пример 2.

- ◆ Рассмотрим схему минилидара, который является копией оптической схемы микролидара из предыдущего примера, но в увеличенном масштабе с коэффициентом увеличения  $\Gamma=10$ . Из предыдущего примера следует, что этого можно достичь посредством увеличения фокусного расстояния линзы  $F$  с 3 мм до 30 мм, и её радиуса  $a$  с 1 мм до 10 мм. Если длина ближней зоны для минилидара  $l$  увеличится до 6 м, то интенсивность обратного рассеяния  $I(\beta)$  не изменится. Зондируемый объём внутри ближней зоны  $l$  оценим, как  $V = \pi a^2 l \approx 1.88 \cdot 10^6 \text{ мм}^3 \approx 0,2 \cdot 10^4 \text{ см}^3$ . Следовательно зондируемый объём для минилидра увеличивается пропорционально коэффициенту подобия в четвёртой степени ( $\Gamma^4$ ) по сравнению с микролидаром.



# Выводы

◆ Микролидар может применяться, как для зондирования малых объёмов среды, так и для калибровки минилидаров в том числе с неоптимальной конфигурацией. Однако, для оптимальной схемы минилидара существует возможность измерения объёма области зондирования посредством применения перфорированных экранов (Арумов и др., 2022). Для микролидара, изготовленного по схеме минилидара, зондируемый объём обратно пропорционален четвёртой степени коэффициента подобия. Применение микролидара позволяет произвести микрофизическую интерпретацию обратного сигнала с применением сигналов обратного рассеяния на отдельных частицах. Такой подход существенно повысит достоверность измерения КОР и может найти применение в задачах дистанционного зондирования приземного слоя атмосферы.

◆ 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. *Ахманов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А. С.* Введение в статистическую радиофизику и оптику // М.: Наука. 1981. 640 стр.
- ◆ 3. *Bohu Liu, Chengtian Song & Yabo Duan.* The characteristics simulation of FMCW laser backscattering signals, *Optical Review*, 2018. vol. 25, pp. 197–204. doi.org/10.1007/s10043-018-0406-7 (моделирование обратного сигнала)
- ◆ 4. *Izhovkina N. I., Artekha S.N., Erokhin N.S., Mikhailovskaya L.A.* Aerosol, plasma vortices and atmospheric processes // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2018. V. 54. No. 11. P. 1513–1524. DOI: 10.1134/S0001433818110038
- ◆ 5. *Kavaya M. J., Menzies R. T.* Lidar aerosol backscatter measurements: systematic, modeling, and calibration error considerations, *Applied Optics*, 1985, vol. 24, no. 21, pp. 3444 - 3453. doi.org/10.1364/AO.24.003444
- ◆ 6. *Klett J. D.* Stable analytical Inversion Solution for Processing Lidar returns, // *Applied Optics*, 1981, V. 20, P. 211-220.
- ◆ 7. *Measures R. M.* *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications* // New York, Wiley, 1983, 912 p.
- ◆ 8. *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. V. 41. № 18. P. 3685-3699. doi.org/10.1364/AO.41003685