

**Совместное применение лидара упругого
рассеяния и нефелометра для
интерпретации обратного сигнала через
эквивалентную среду**

Г. П. Арумов, А. В. Бухарин

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

- ◆ Микрофизическая интерпретация обратного сигнала от рассеивающей среды основана на применении ненормализованных моментов.
- Ненормализованный момент k -ого порядка представляет собой сумму соответствующих степеней для площади поперечных сечений частиц. Отношение второго и первого моментов для площади поперечных сечений частиц даёт эквивалентное сечение. Отношение квадрата ненормализованного момента первого порядка к ненормализованному моменту второго порядка даёт информацию о количестве (концентрации) эквивалентных частиц. Измерения эквивалентной концентрации являются относительными. Для этого могут использоваться сигналы обратного и прямого рассеяния на отдельных частицах, а так же цифровые фотографии. Наличие концентрации эквивалентных частиц и коэффициентов КЭ и КОР позволяет определять дифференциальное сечение обратного рассеяния и сечение экстинкции на эквивалентной частице. Предлагаемый подход имеет перспективы применения для исследования рассеивающих объектов, состоящих из полидисперсных и несферических частиц. Такие частицы содержатся в приземном слое атмосферы.

Ненормализованные моменты

$$E^\Sigma(S^k) = \sum_i S_i^k, \text{ где } i=1, 2, 3 \dots 144$$

$$N_{21} = \frac{E^\Sigma(S)}{S_e} = \frac{E^\Sigma(S)^2}{E^\Sigma(S^2)}$$

$$S_e = S_{21} = \frac{E^\Sigma(S^2)}{E^\Sigma(S)}$$

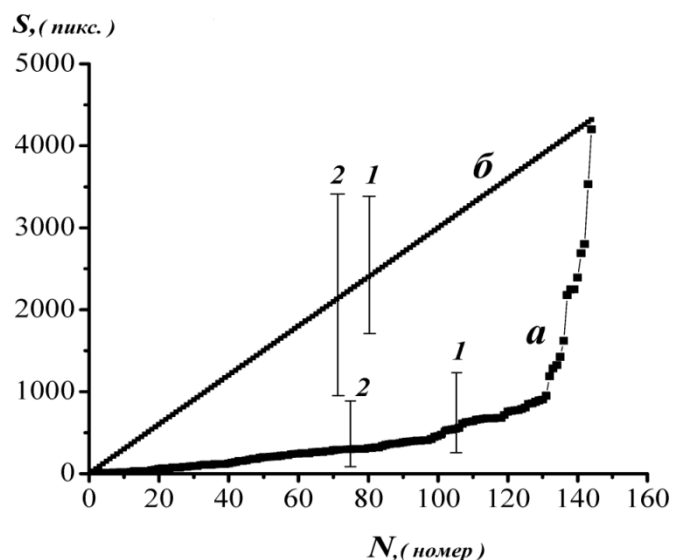
$$N_{k,k-1} = \frac{E^\Sigma(S^{k-1})^k}{E^\Sigma(S^k)^{k-1}}$$

$$S_{k,k-1} = \frac{E^\Sigma(S^k)}{E^\Sigma(S^{k-1})}$$

$$E^\Sigma(S)=70130, E^\Sigma(S^2)=9.641 \cdot 10^7, E^\Sigma(S^3)=2.33 \cdot 10^{11}, E^\Sigma(S^4)=7.153 \cdot 10^{14}$$

$$\text{Получаем } S_{21}=1371, N_{21}=51, S_{21}N_{21}=69921.$$

Зависимость концентрации от порядка ненормализованных моментов



(а) реальное распределение

k	$S_{k,k-1}$	$N_{k,k-1}$	$S_{k,k-1} N_{k,k-1}$
2	1371	51	69921
3	2417	16	38672
4	3070	8	24560

С увеличением порядка используемых моментов сечение k -ого порядка увеличивается, концентрация уменьшается

70130 пикселям соответствуют $6.8 \cdot 10^5 \text{ мкм}^2$ (0.68 мм^2)

Пропускание ПЭ $T = 4.4 \cdot 10^{-3}$

(б) равномерное распределение

k	$S_{k,k-1}$	N_{21}	$S_{k,k-1} N_{21}$
2	2891	108	312228
3	3249	85	276165
4	3469	70	242830

Способы определения концентрации

- А. По пропусканию и угловой трансформации пучка.
- Б. По цифровым микрофотографиям частиц
- В. По пропусканию 3d экранов, созданных по изображениям частиц.
- Г. С применением нефелометров при наличии информации об оптических и физических свойствах частиц.

Использование концентрации измеренных нефелометром эквивалентных частиц

Контактные методы с применением интенсивностей рассеяния отдельными частицами. Эквивалентное значение концентрации указанных частиц n_{eq} определяется из ненормализованных моментов первого и второго порядков для обратных сигналов $i_m(\pi)$ от отдельных частиц как

$$n_{eq}(\pi) = n_{1,2} = \frac{\left(\sum_{m=1}^N i_m(\pi) \right)^2}{V \left(\sum_{m=1}^N i_m^2(\pi) \right)}$$

Аэрозольную компоненту коэффициента обратного рассеяния β_a можно выразить через параметры эквивалентной среды следующим выражением

$$\beta_a = n_{eq} \frac{d\sigma_{eq}(\pi)}{d\Omega},$$

Это позволяет найти дифференциальное сечение рассеяния на отдельной эквивалентной частице

$$\frac{d\sigma_{eq}(\pi)}{d\Omega} = \frac{\beta_a}{n_{eq}}$$

Промежуточные выводы

А. Коэффициент обратного рассеяния и концентрация эквивалентных частиц позволяют определить дифференциальное сечение обратного рассеяния на

отдельной частице $\frac{d\sigma_{eq}(\pi)}{d\Omega}$

Б. Коэффициент экстинкции и концентрация эквивалентных частиц в слое позволяют определить полное сечение рассеяния на одной частице.

Зондирование приземного слоя атмосферы, содержащего частицы с разнообразными оптическими и физическими свойствами, позволяет производить оценку геометрического сечения эквивалентных частиц аналогично радиолокационному сечению как

$$\sigma_g = 4\pi \frac{d\sigma_{eq}(\pi)}{d\Omega}$$

Обсуждение

Для микрофизической интерпретации обратного сигнала может быть применена модель зондируемой среды как эквивалентной. Эквивалентная среда однозначно связана с исследуемой средой и состоит из монодисперсных частиц. Посредством контактных измерений обратного рассеяния на отдельных частицах с помощью ненормализованных моментов можно определить концентрацию эквивалентных частиц. Для этого достаточно использовать относительные измерения обратных сигналов на отдельных частицах. Концентрация эквивалентных частиц, как правило, меньше концентрации частиц, составляющих рассеивающий объект. Это связано с наличием функции распределения частиц по поперечным сечениям. Для несферических частиц концентрация эквивалентных частиц зависит от ориентации плоскости сечений частиц по отношению к линии зондирования. Для монодисперсных сферических частиц концентрация эквивалентных частиц равна концентрации наблюдаемых частиц.

Выводы

Рассмотрен способ определения концентрации эквивалентных частиц внутри слоя по измерениям сигналов обратного рассеяния на отдельных частицах. Измеренный лидаром коэффициент обратного рассеяния в некоторой точке трассы и контактные измерения концентрации эквивалентных частиц позволяют найти дифференциальное сечение рассеяния на отдельной эквивалентной частице. Предложенный способ дистанционного измерения концентрации эквивалентных частиц имеет перспективы применения в задачах лидарного зондирования приземных трасс, содержащих полидисперсные и несферические частицы с различными физическими свойствами. Это даёт возможность производить интерпретацию базовых коэффициентов через параметры эквивалентной среды. Представленный метод дистанционного определения концентрации частиц имеет перспективы применения для зондирования приземного слоя атмосферы миниатюрными лидарами упругого рассеяния с предельно низким уровнем мощности зондирующего излучения в импульсе.

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

1. *Arumov G. P., Bukharin A. V., Makarov V. S.* Three-dimensional reflecting objects in the problem of modeling a lidar signal from a scattering layer // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2022. V. 19. No. 4, P. 328–334 (in Russian), DOI: [10.21046/2070-7401-2022-19-4-328-334](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-4-328-334)
2. *Arumov G. P. and Bukharin A. V.* Three-Dimensional screens for measuring Non-normalized Moments // *Measurement Techniques*. 2018. V. 61. No. 9. P. 908-913. DOI [10.1007/s11018-018-1523-1](https://doi.org/10.1007/s11018-018-1523-1)
3. *Arumov G. P., Bukharin A. V., Tyurin A.V.* Use of Statistically Inhomogeneous Screens in Calibration of Lidar from the Parameters of Images of Particles for the Bottom Layer of the Atmosphere // *Measurement Techniques*. 2014. V. 57. No. 3. P. 287–293. DOI.org/[10.1007/s11018-014-0447-7](https://doi.org/10.1007/s11018-014-0447-7)
4. *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](https://doi.org/10.1070/QEL16009)
5. *Kavaya M. J., Menzies R. T.* Lidar aerosol backscatter measurements: systematic, modeling, and calibration error considerations // *Applied Optics*. 1985. V. 24. No. 21, P. 3444 - 3453. DOI.org/[10.1364/AO.24.003444](https://doi.org/10.1364/AO.24.003444) 6
6. *Measures R. M.* *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*. New York: Wiley, 1983. P. 912.
7. *Veslovskii I., Kolgotin A., Griaznov V., Muller D., Wandinger U., and Whiteman D. N.* Inversion with regularization for the retrieval of tropospheric aerosol parameters from multiwavelength lidar sounding // *Applied Optics*. 2002. V. 41. No. 18. P. 3685-3699. DOI.org/[10.1364/AO.41.003685](https://doi.org/10.1364/AO.41.003685)