

М.М. Кугейко

## Анализ и учет факторов, влияющих на точность определения коэффициентов ослабления при использовании передвижного лидара

Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

Поступила в редакцию 3.05.2000 г.

Предложены варианты решения проблемы нестабильности излучения в методе определения оптических характеристик рассеивающих сред с использованием передвижного лидара, оценена погрешность определения коэффициентов ослабления при использовании сигналов обратного рассеяния от множества общих рассеивающих точек, установлена и оценена взаимосвязь между атмосферной (гидросферной) ситуацией (величина  $\epsilon$  или  $S_m$ ), пространственным разрешением и ошибкой измерения сигналов обратного рассеяния.

В настоящее время в связи с ухудшением экологической обстановки требуется систематическое и оперативное определение аэрозольных и газовых составляющих атмосферы, загрязнений окружающей среды. Решение данных задач в глобальном масштабе невозможно без использования самолетных измерений, измерений с борта кораблей, с буксируемых измерительных систем и т.п.

Важную роль в глобальном мониторинге окружающей среды могут играть лидарные системы, установленные на перемещаемой в пространстве платформе (спутник, самолет, корабль и т.п.), поскольку данные системы при возможности оперативного изменения своего местоположения обладают и свойством дистанционности [1–3].

Практически все существующие лидарные методы определения оптических характеристик рассеивающих сред (атмосферы, воды) [1–3] основаны на решении уравнения оптической локации с переменным верхним пределом интегрирования:

$$S(R, r) = AP_0\sigma_\pi(r) \exp \left\{ -2 \int_R^r \epsilon(r) dr \right\}, \quad (1)$$

где  $S(R, r) = P(R, r) (r - R)^2$ ;  $\sigma_\pi(r) = g_\pi(r) \epsilon(r)$ ;  $P(R, r)$ ,  $P_0$  – мощности принимаемого и излучаемого сигналов соответственно;  $A$  – аппаратная постоянная;  $\sigma_\pi(r)$ ,  $\epsilon(r)$ ,  $g_\pi(r)$  – коэффициенты рассеяния назад, ослабления и индикатриса рассеяния под углом  $180^\circ$  в точке  $r$ ;  $R$  – точка местоположения лидара.

Решению уравнения (1) при переменном верхнем пределе интегрирования  $r$  эквивалентно решение дифференциального уравнения первого порядка с двумя неизвестными  $g_\pi(r)$  и  $\epsilon(r)$ :

$$\epsilon'_k(r) - \frac{S'_r(R; r)}{S_r(R; r)} \epsilon(r) - \frac{g'_\pi(r)}{g_\pi(r)} \epsilon(r) - 2\epsilon^2(r) = 0. \quad (2)$$

Оно может быть решено при известных граничных или начальных значениях. Это практически требует либо привлечения априорной информации, допущений о характере среды, либо проведения дополнительных независимых измерений.

При переменном нижнем пределе интегрирования (этот случай соответствует перемещению лидара и регистрации сигналов обратного рассеяния от общих рассеивающих точек, что дает основание называть метод динамическим) дифференциальное уравнение, эквивалентное (1), имеет вид [4]:

$$S'_R(R, r) = 2 \epsilon(R) S_R(R, r). \quad (3)$$

Решение уравнения (3) относительно  $\epsilon(R)$  не требует использования допущений или априорной информации об исследуемой среде. Однако для измерения  $\epsilon(R)$  требуется в этом случае вычисление производных от сигналов, измеряемых в эксперименте с погрешностью, что ввиду некорректности такой задачи может привести к большим ошибкам в определении  $\epsilon(R)$ .

Для атмосферных, гидросферных измерений реально производятся измерения средних значений  $\epsilon$  на достаточно протяженном участке  $\Delta R$ . Выражение для  $\bar{\epsilon}(\Delta R)$  в этом случае записывается следующим образом [4]:

$$\bar{\epsilon}(\Delta R) = - \frac{1}{2\Delta R} \ln \frac{S(R; r)}{S(R + \Delta R; r)}. \quad (4)$$

Очевидно, что значения оптических характеристик, получаемых рассматриваемым методом, не зависят от местоположения общей рассеивающей точки  $r$ . Следовательно, измеряя сигналы обратного рассеяния от  $N$  общих рассеивающих точек  $r_i$ , можно определить значение  $\bar{\epsilon}(\Delta R)$  как среднее арифметическое величин  $\epsilon_i(\Delta R)$ , получаемых путем независимой обработки сигналов для каждой из точек  $r_i$ . Это позволяет уменьшить влияние погрешностей

измерения статистически независимых сигналов обратного рассеяния на точность определения  $\bar{\varepsilon}(\Delta R)$ .

Сравним погрешности измерения коэффициентов ослабления при использовании одной и множества рассеивающих точек. Используя метод конечных приращений [5], легко получить значения погрешностей определения  $\bar{\varepsilon}$  с использованием выражения (4):

$$\delta\varepsilon(\Delta R) = \frac{1}{2\tau} [\delta S(R, r) + \delta S(R + \Delta R, r)], \quad (5)$$

где  $\tau = \varepsilon\Delta R$ ;  $\delta\varepsilon = \Delta\varepsilon/\varepsilon$ ;  $\delta S = \delta/s$ ;  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение измеряемых сигналов обратного рассеяния;

$$\Delta\varepsilon = \left| \frac{\partial\varepsilon}{\partial S(R, r)} \right| \Delta S(R, r) + \left| \frac{\partial\varepsilon}{\partial S(R + \Delta R, r)} \right| \Delta S(R + \Delta R, r).$$

Если считать, что абсолютные ошибки измерения сигналов обратного рассеяния  $S(R, r)$  и  $S(R + \Delta R, r)$ , отличающихся на величину ослабления на участке перемещения лидара  $\Delta R$  (пространственное разрешение), равны, то (5) принимает вид

$$\delta\varepsilon = \frac{1}{\tau} \delta S.$$

При использовании множества рассеивающих точек  $r_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) для определения  $\bar{\varepsilon}(\Delta R)$  погрешность измерения величины сигнала  $S_N$ , являющегося средним значением от  $N$  общих рассеивающих точек, описывается выражением

$$\delta S_N = \frac{\sqrt{D \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \right]}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sigma_i^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i}.$$

Если считать, что  $\sigma_i$  для используемых точек  $r_i$  примерно одинаковы (или  $\sigma_n$  не превышает  $\sigma$ ), то

$$\delta \bar{S}_N = \frac{1}{\sqrt{N}} \frac{\sigma}{\bar{S}_N},$$

а

$$\delta\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{N}} \delta \bar{S}_N + \delta(\Delta R).$$

При равенстве погрешностей  $\delta S$  и  $\delta \bar{S}_N$  измерения сигнала обратного рассеяния от одной общей рассеивающей точки и среднего значения сигнала обратного рассеяния от  $N$  общих рассеивающих точек погрешность определения  $\varepsilon(\Delta R)$  при использовании множества рассеивающих точек примерно в  $\sqrt{N}$  раз меньше. На практике это сводится к тому, что если задаваемая (требуемая) погрешность измерения сигнала обратного рассеяния достигается в  $j$ -й общей рассеивающей точке, то  $N$  других общих рассеивающих точек, используемых для уменьшения погрешности определения  $\bar{\varepsilon}(\Delta R)$ , должны располагаться до  $j$ -й точки.

Так как энергия излучения оптических источников, в том числе и лазерных, отличается определенной неста-

бильностью, то очевидно, что в динамических методах с использованием прямолинейного перемещения данная нестабильность должна проявляться, так как они используют рассеянные сигналы для отличающихся по времени посылок зондирующего излучения. Влияние названного фактора – нестабильности источника излучения – легко устраняется. Достигается это следующим образом. Посылку импульсов от источников излучения с координатой в точке  $R$  осуществляют в двух противоположных направлениях. С этих направлений производят прием и преобразование рассеянного в обратном направлении зондирующего излучения в электрические сигналы (рис. 1).

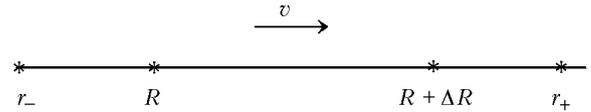


Рис. 1. Схема измерения сигналов обратного рассеяния для исключения влияния нестабильности мощности источника излучения

После усиления этих сигналов пропорционально квадрату текущего времени, отсчитываемого от момента посылки светового импульса, выражение (1), описывающее регистрируемые сигналы, принимает вид

$$S'(R, r_+) = A_+ P_R^{r_+} \sigma_\pi(r_+) \exp \left\{ -2 \int_R^{r_+} \varepsilon(r) dr \right\} \quad (6)$$

$$S'(R, r_-) = A_- P_R^{r_-} \sigma_\pi(r_-) \exp \left\{ -2 \int_{r_-}^R \varepsilon(r) dr \right\}$$

где  $A_+$  и  $A_-$  – постоянные приемников, принимающих рассеянное излучение с противоположных направлений;  $P_R^+$  и  $P_R^-$  – мощности посылаемого излучения из точки с координатой  $R$  в каждом из направлений;  $\sigma(r_+)$ ,  $\sigma(r_-)$  – коэффициенты обратного рассеяния в точках с координатами  $r_+$  и  $r_-$  (в противоположных направлениях).

Аналогичные выражения можно записать при посылке зондирующего импульса в точке с координатой  $R + \Delta R$ :

$$S'(R + \Delta R, r_+) = A_+ P_{R+\Delta R}^{r_+} \sigma_\pi(r_+) \exp \left\{ -2 \int_{R+\Delta R}^{r_+} \varepsilon(r) dr \right\}; \quad (7)$$

$$S'(R + \Delta R, r_-) = A_- P_{R+\Delta R}^{r_-} \sigma_\pi(r_-) \exp \left\{ -2 \int_{r_-}^{R+\Delta R} \varepsilon(r) dr \right\}$$

Из (6) и (7) легко получить выражение для  $T(\Delta R) = \exp \left\{ - \int_R^{R+\Delta R} \varepsilon(r) dr \right\}$ :

$$T(\Delta R) = \sqrt[4]{S'^+ / S'^-}, \quad (8)$$

где

$$S'^+ = S'(R, r_+) / S'(R + \Delta R, r_+), \quad S'^- = S'(R, r_-) / S'(R + \Delta R, r_-).$$

Выражение (8) для прозрачности на участке перемещения лидара  $\Delta R$  не включает энергий посылок зондирующего излучения в различных направлениях, что в свою очередь, говорит о независимости в этих случаях рассматриваемого метода от нестабильности источников излучения. На практике посылка зондирующего излучения по противоположным направлениям в любом из вариантов динамического метода осуществляется сравнительно просто и особо не усложняет метод.

В другом варианте вместо посылки зондирующего излучения в противоположном направлении можно часть излучения, посылаемого по направлению движения, отводить на фотоприемное устройство и регистрировать его. Однако при этом необходимо знать коэффициент отражения светового потока или же провести калибровочные измерения по его установлению.

Посылка зондирующего излучения в направлении перемещения лидара и в противоположном позволяет на практике решать и такую задачу, как влияние на оптические характеристики среды возмущения, вносимого перемещаемым объектом.

Измеряемые сигналы  $S(R, r)$  от общей рассеивающей точки при различных положениях лидара (источника) отличаются друг от друга величиной ослабления принимаемого сигнала на участке перемещения. Если для водных рассеивающих сред (океана, рек, озер) ослабление значительно даже для малых участков перемещения, то для атмосферы, особенно прозрачной, необходимы большие расстояния для заметного ослабления излучения. Это приводит к необходимости проведения измерений сигналов рассеяния с высокой точностью, которая во многих ситуациях не может быть достигнута современными измерительными средствами.

Рассматриваемая особенность вытекает из определения элементарного рассеивающего объема в оптике рассеивающих сред, у которого линейные размеры для чистой атмосферы исчисляются сотнями метров, а для мутного коллоидного раствора – долями миллиметра. Поэтому очень важно выявить возможности пространственного разрешения рассматриваемого метода для достигаемой современными информационно-измерительными системами точности измерений при различных метеорологических ситуациях.

Ниже приводится соотношение, связывающее пространственное разрешение  $\Delta R$  с погрешностью измерительной аппаратуры и характером рассеивающей среды (прозрачная атмосфера, дымка, туман, облако, вода), характеризующимся метеорологической дальностью видимости  $S_m$ .

Считаем, что абсолютная ошибка измерения сигнала обратного рассеяния  $S(R)$ , восстановленных на квадрат расстояния, не может превышать половины их разности для двух положений приемно-излучающего устройства ( $\Delta \leq \Delta S/2$ ), где  $\Delta = S - S_{ист}$ ,  $S_{ист}$  – истинное значение сигналов. Это неравенство является условием максимально допустимой погрешности измерений. В противном случае можно получить физически бессмысленные результаты (отрицательное значение для коэффициента ослабления, прозрачность больше единицы).

Разность сигналов  $\Delta S$  можно представить в следующем виде:

$$\Delta S = S(R + \Delta R, r) - S(R, r) = AP_0 \sigma_{\pi}(r) \exp \left\{ -2 \int_{R+\Delta R}^r \epsilon(r) dr \right\} \times \left[ 1 + \exp \left\{ -2 \int_R^{R+\Delta R} \epsilon(r) dr \right\} \right]. \quad (9)$$

Абсолютная ошибка измерения сигнала  $\Delta = \delta S \cdot S$  ( $\delta S$  – погрешность измерения сигнала) равна:

$$\Delta = \delta S \cdot AP_0 \sigma_{\pi}(r) \exp \left\{ -2 \int_{R+\Delta R}^r \epsilon(r) dr \right\}. \quad (10)$$

Подставляя (9), (10) в неравенство, получаем

$$2\delta S < \left[ 1 + \exp \left\{ -2 \int_R^{R+\Delta R} \epsilon(r) dr \right\} \right]. \quad (11)$$

Из (11) легко приходим к соотношению

$$-\frac{1}{2} \ln(1 - 2\delta S) < \tau \quad (12)$$

или

$$[-S_m \ln(1 - 2\delta S)]/7,8 < \Delta R, \quad (13)$$

где  $S_m = 3,9/\epsilon$ .

Соотношения (12), (13) выражают зависимость между пространственным разрешением, необходимой погрешностью измерения сигналов рассеяния и атмосферной ситуацией ( $\epsilon$  или  $S_m$ ). Таким образом, зная возможности измерительной аппаратуры, можно из (12) или (13) установить минимальное пространственное разрешение для различных метеорологических ситуаций.

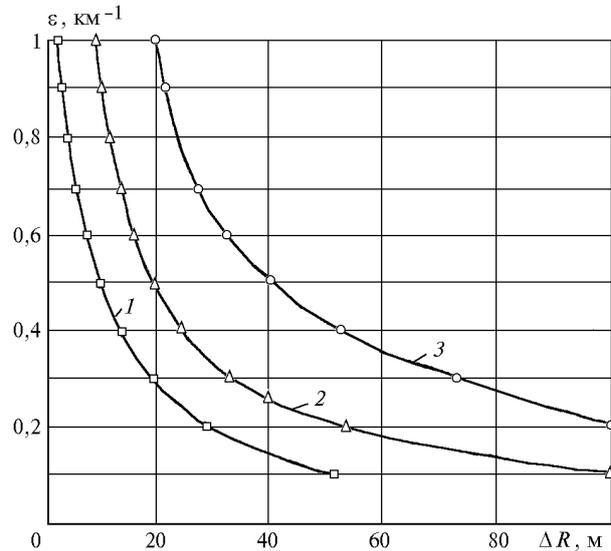


Рис. 2. Зависимость между пространственным разрешением и оптической плотностью рассеивающей среды при различных погрешностях измерения сигнала (1 –  $\delta P = 0,5\%$ ; 2 –  $1\%$ ; 3 –  $2\%$ )

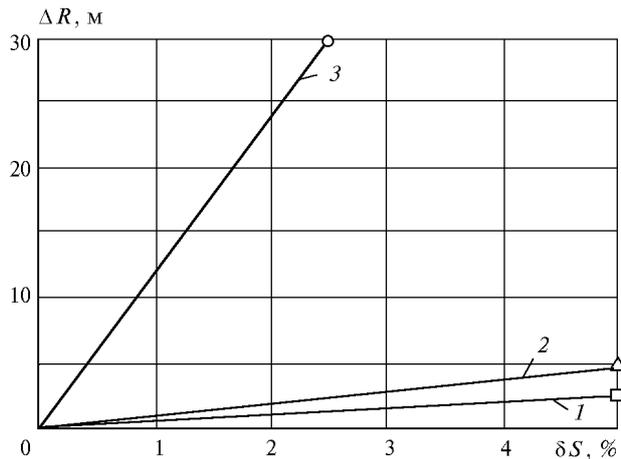


Рис. 3. Зависимость между пространственным разрешением и погрешностью измерения сигнала в оптически плотных рассеивающих средах (1 –  $S_m = 0,2$  км; 2 –  $0,4$  км; 3 –  $3,9$  км)

На рис. 2, 3 приведены результаты расчета минимального разрешения для различных атмосферных условий,

которые характеризуются величиной метеорологической дальности видимости  $S_m$ , при различных погрешностях измерения сигналов. Как видно, пространственное разрешение сильно зависит от точности измерительной аппаратуры. Так, для прозрачной атмосферы ( $S_m = 39$  км) увеличение точности измерения сигналов с 1 до 0,5% уменьшает пространственное разрешение со 100 до 50 м. Если для облаков и туманов при обычных погрешностях измерительная аппаратура ( $\delta P = 2\%$ ) достигается разрешение в метрах, то для дымок необходимы десятки метров.

1. *Лазерный контроль атмосферы* / Под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 316 с.
2. *Креков Г.М., Кавьянов С.И., Крекова М.М.* Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 173 с.
3. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
4. *Кугейко М.М., Сергеев Н.М., Ашкинадзе Д.А.* // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1982. Т. 18. № 12. С. 1286–1302.
5. *Рабинович С.Г.* Погрешности измерений. Л.: Энергия, 1978. 261 с.

***M.M. Kugeiko. Analysis and consideration of factors affecting the accuracy in determination of the attenuation coefficients, when using movable lidar.***

Variants for solving the problem of radiation instability in determination of optical characteristics of scattering media with use of movable lidar are proposed. An error in determination of attenuation factors is estimated, when using backscattering signals from a set of common scattering points. A relation between atmospheric (hydrospheric) situation (the value  $\epsilon$  or  $S_m$ ), spatial resolution, and measurement error of backscattered signals is found and evaluated.