

М.М. Кугейко, И.А. Малевич, Д.Э. Шиперко

О КОРРЕКЦИИ ЛИДАРНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ОТНОСИТЕЛЬНО ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕИВАЮЩИХ СРЕД

Предлагается способ повышения точности восстановления коэффициентов ослабления слоисто-неоднородных сред путем коррекции сигналов обратного рассеяния на перепад лидарного отношения. Приводится алгоритм определения коэффициентов коррекции. Показывается, что абсолютная величина коэффициента коррекции характеризует степень изменения качественного состава среды. Оценивается эффективность предлагаемого способа, приводятся результаты численного моделирования.

В настоящее время предложено множество методов интерпретации лидарных сигналов и ведутся поиски новых алгоритмов. Все известные методы исходят из решения лидарного уравнения

$$P(z) = Az^{-2}T^2(0; z_0)\beta_\pi(z)T^2(z_0; z), \quad (1)$$

где $P(z)$ — регистрируемый сигнал обратного рассеяния из точки z ; A — аппаратная константа лидара; $\beta_\pi(z) = \beta(z)g(z)$ — коэффициент обратного рассеяния; $g(z)$, $\beta(z)$ — соответственно лидарное отношение и коэффициент ослабления в точке z ; $T(0; z_0)$, $T(z_0; z)$ — прозрачности участков трассы зондирования. Решение уравнения (1) относительно $T(z_0; z)\beta(z)$ для экспериментально определяемой функции $\psi(z) = P(z)z^2A^{-1}g^{-1}(z)T^{-2}(0; z_0)$ (см. [1]) имеет вид

$$\beta(z) = \psi(z) \left[\frac{\psi(z_k)}{\beta(z_k)} - 2 \int_{z_k}^z \psi(z') dz' \right]^{-1}, \quad (2)$$

$$T^2(z_0; z) = \frac{\psi(z_k)}{\beta(z_k)} - 2 \int_{z_k}^z \psi(z') dz'. \quad (3)$$

В данной статье покажем, что использование решений (2) (с локальной калибровкой) и (3) (с интегральной калибровкой), а также их комбинаций позволяет реализовать любую из используемых на практике схем обработки лидарных сигналов (и метод асимптотического сигнала [2, 3] и метод Клетта [4] и т.д.). Необходимо отметить, что практически все известные методы, следующие из (2) и (3), ввиду невозможности априорного знания $g(z)$ по всей исследуемой трассе используют некоторые допущения, в частности наиболее часто предположение, что $g(z)$ постоянное или медленно меняющееся. Используемая же при решении лидарного уравнения известная линейная стохастическая связь между $\ln\beta_\pi$ и $\ln\beta$ хорошо удовлетворяет только случаю неизменной микроструктуры.

Из изложенного выше следует, что в случае зондирования слоисто-неоднородных сред, в которых наряду с изменением концентрации рассеивающих частиц по трассе происходит изменение их микроразлических характеристик (микроструктуры), а значит, и $g(z)$, использование алгоритмов, основанных на неизменности $g(z)$, становится некорректным. Очевидно и следствие из этого — рост ошибки восстановления $\beta(z)$. Ниже показана возможность повышения точности восстановления $\beta(z)$ для таких сред на всех ее участках. Методика основана на коррекции функции $\psi(z)$ на перепад лидарного отношения. Предлагаются алгоритмы определения коэффициента коррекции. Показывается, что абсолютное значение коэффициента коррекции характеризует изменение сигнала обратного рассеяния, обусловленное степенью изменения качественного состава среды. Оценивается эффективность предлагаемой методики, приводятся результаты численного моделирования.

Рассмотрим случай зондирования n -слойной рассеивающей среды. Относительное изменение лидарного отношения от слоя i к слою k можно выразить через параметр $g_{ik} = \bar{g}_k / \bar{g}_i$, где \bar{g}_i , \bar{g}_k — соответственно средние значения лидарного отношения в слоях i и k . Сравним экспериментально определяемые функции $\psi(z)$ из (1) для произвольной точки z в слоях i и k :

$$\psi_i(z) = S(z)C_i, \quad (4)$$

$$\psi_k(z) = S(z)C_k, \quad (5)$$

где $S(z) = P(z)z^2$; $C_i = A^{-1}T^{-2}(0; z_0)\bar{g}_i^{-1}$; $C_k = A^{-1}T^{-2}(0; z_0)\bar{g}_k^{-1}$.

Как видно из (4) и (5) при переходе от слоя i к слою k происходят изменения функции $\psi(z)$ за счет изменения лидарного отношения. Величина этого изменения равна q_{ik} , так как $C_i = C_k q_{ik}$. А это означает, что при расчете $\beta(z)$ в слое i необходимо производить корректировку в константе C_k , используемой в слое k , на величину q_{ik} . Физический смысл необходимости корректировки состоит в использовании одной константы для всей многослойной трассы зондирования, что означает сведение алгоритма к модели с постоянством лидарного отношения по всей трассе. Другими словами, для более корректного использования методик, требующих предположения $g(z) = \text{const}$, в случае многослойных сред необходима подстройка (корректировка) сигнала обратного рассеяния под используемое предположение. Таким образом, задана более корректного восстановления коэффициента ослабления в случае одностороннего зондирования многослойных сред требует знания относительного изменения лидарного отношения от слоя к слою, выражаемого через коэффициент коррекции q_{ik} . Так как ниже авторы предлагают способы определения q_{ik} из измеряемых сигналов обратного рассеяния, то требование знания q_{ik} не является осложняющим предлагаемую методику, тем более что, как будет показано, корректировка на q_{ik} позволяет значительно улучшить точность восстановления профилей $\beta(z)$ и за границами разделов сред.

Для обоснования только что сказанного рассмотрим функционалы $I(z) = \int_z^{z+\Delta z} S(z) dz$, которые имеют вид [2]:

$$I(z; z + \Delta z) = \frac{1}{2} \overline{\text{Ag}(z; z + \Delta z)} T^2(0; z) \left[1 - \exp \left\{ -2 \int_z^{z+\Delta z} \beta(z') dz' \right\} \right]. \quad (6)$$

При выполнении внутри слоев i, k условий

$\overline{g(z_i; z_i + \Delta z_i)} = \overline{g(z_i + \Delta z_i; z_i + 2\Delta z_i)} = \bar{g}_i$; $\overline{g(z_k; z_k + \Delta z_k)} = \overline{g(z_k + \Delta z_k; z_k + 2\Delta z_k)} = \bar{g}_k$; и $T(z_i; z_i + \Delta z_i) = T(z_i + \Delta z_i; z_i + 2z_i) = T(\Delta z_i)$; $T(z_k; z_k + \Delta z_k) = T(z_k + \Delta z_k; z_k + 2z_k) = T(\Delta z_k)$ для функционалов $I_1 = I(z_i; z_i + \Delta z_i)$; $I_2 = I(z_i + \Delta z_i; z_i + 2\Delta z_i)$; $I_3 = I(z_k; z_k + \Delta z_k)$; $I_4 = I(z_k + \Delta z_k; z_k + 2\Delta z_k)$ можно записать следующую систему уравнений (z_i, z_k — произвольные точки в соответствующих им слоях i, k ; Δz_i и Δz_k — произвольные и необязательно равные):

$$\begin{aligned} I_1 &= \text{Ag}_i T^2(0; z_i) [1 - T^2(\Delta z_i)]; \\ I_2 &= \text{Ag}_i T^2(0; z_i) T^2(\Delta z_i) [1 - T^2(\Delta z_i)]; \\ I_3 &= \text{Ag}_k T^2(0; z_i) T^4(\Delta z_i) T^2(z_i + 2\Delta z_i; z_k) [1 - T^2(\Delta z_k)]; \\ I_4 &= \text{Ag}_k T^2(0; z_i) T^4(\Delta z_i) T^2(z_i + 2\Delta z_i; z_k) T^2(\Delta z_k) [1 - T^2(\Delta z_k)]. \end{aligned} \quad (7)$$

Решение системы (7) относительно \bar{g}_k / \bar{g}_i имеет вид

$$q_{ik} = \frac{\bar{g}_k}{\bar{g}_i} = \left(\frac{I_3}{I_2} \right)^2 \frac{(I_1 - I_2)}{(I_3 - I_4)} T^{-2}(z_i + 2\Delta z_i; z_k). \quad (8)$$

Условие равенства средних значений лидарного отношения и коэффициента ослабления для произвольных участков на трассе (больших или малых) является менее жестким по сравнению с требованием постоянства $g(z)$ по всей трассе или с постоянством g и β на участках (метод логарифмической производной). Данное условие с достаточной для практического использования точностью выполняется в большинстве реальных ситуаций (на протяженных участках даже в случае значительных флуктуаций характеристик). Достаточным условием работоспособности алгоритма (8) является превышение изменения величин сигнала для двух соседних участков абсолютной погрешности их измерения. Более того, даже в случае приблизительного установления q_{ik} из-за большого разброса g и β корректировка лидарного сигнала под используемое предположение улучшает результат восстановления профиля $\beta(z)$.

Из (8) следует, что для определения q_{ik} необходимо знание прозрачности участка среды, включающего и границы раздела слоев. Как показано в [5], для таких ситуаций хорошо работает алгоритм

$$T^2(z_i + 2\Delta z_i; z_k) = \frac{I_6 - I_5}{I_6 - \frac{I_4}{I_8} I_5}, \quad (9)$$

где

$$I_5 = I(z_i + 2\Delta z_i; z_k) = \int_{z_i + 2\Delta z_i}^{z_k} S(z) dz; \quad I_6 = I(z_i + 2\Delta z_i; z_k + 2\Delta z_k) = \int_{z_i + 2\Delta z_i}^{z_k + 2\Delta z_k} S(z) dz.$$

Условия применимости (9) подробно рассмотрены в [5]. В частности, для случая пространственно-неоднородных сред с некоррелированными флуктуациями оптических характеристик приводится выражение для выбора участков в зависимости от степени неоднородности среды.

Таким образом, из (8) и (9) легко определить коэффициент коррекции сигналов обратного рассеяния для любого из слоев n -слойной рассеивающей среды. Для соседних слоев, т. е. двухслойных рассеивающих сред (например, атмосфера – вода, атмосфера – облако и т. д.), алгоритм определения $q_{i, i+1}$ упрощается. В этом случае $T^2(z_i + 2\Delta z_i, z_k) \rightarrow 1$ и (8) принимает вид

$$q_{i, i+1} = \frac{\bar{g}_{i+1}}{\bar{g}_i} = \left(\frac{I_3}{I_2} \right)^2 \frac{I_1 - I_2}{I_3 - I_4}. \quad (10)$$

Параметр $q_{i, i+1}$ зависит только от микрофизических характеристик рассеивающей среды и не зависит ни от концентрации рассеивателей, ни от аппаратных констант лидара. Если изменение микрофизических характеристик не происходит, то $q_{ik} = 1$, что можно использовать для выявления границ качественного изменения рассеивателей. Абсолютное значение q_{ik} показывает величину изменения сигнала обратного рассеяния за счет изменения качественного состава. Даже если одновременно со скачком лидарного отношения на границе происходит и скачкообразное изменение коэффициента ослабления (концентрации), то и в этом случае значение q_{ik} показывает, какую часть в изменении сигнала обратного рассеяния составляет изменение $g(z)$, т. е. изменение качественного состава. Это следует из (10), так как данное выражение для q_{ik} не содержит $T^2(\Delta z_i)$ и $T^2(\Delta z_k)$ и при выводе (10) никаких предположений о поведении перепада $T^2(\Delta z_i)$ и $T^2(\Delta z_k)$ не делалось.

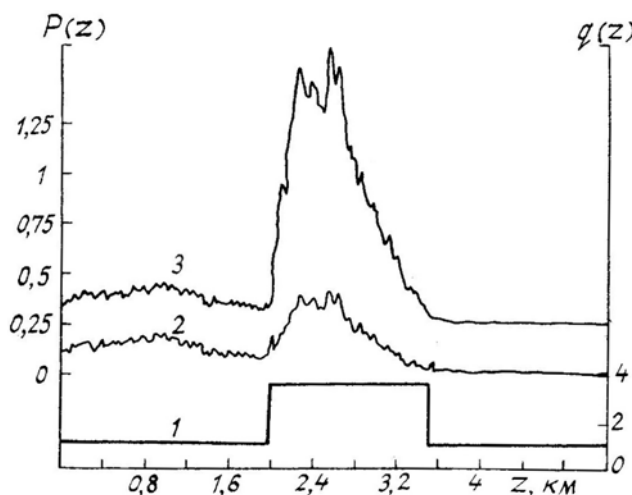


Рис. 1. Результат коррекции лидарного сигнала с учетом функции q_{ik} : 1 – корректирующая функция $q(z)$, восстановленная из лидарного сигнала по (8)–(10); 2 – скорректированный лидарный сигнал; 3 – исходный лидарный сигнал; кривые 2 и 3 смещены вверх соответственно на 1 и 2 деления шкалы

Покажем, что использование корректирующей функции q_{ik} позволяет значительно улучшить восстановление профиля коэффициента ослабления $\beta(z)$ всеми известными методами, использующими предположение о неизменности лидарного отношения по трассе. С целью проверки эффективности предложенного метода проводился математический эксперимент. По заданным профилям $\beta(z)$ и $g(z)$ в приближении однократного рассеяния рассчитывался отраженный назад сигнал. Для каждого слоя согласно выражениям (8), (9), (10) рассчитывались значения функции q_{ik} , с помощью которых производилась коррекция лидарного сигнала. Результаты коррекции сигналов обратного рассеяния для трехслойной среды с заданным профилем лидарного отношения и коэффициенты ослабления представлены на рис. 1. Кривая 3 на нем – сигнал обратного рассеяния, рассчитанный без коррекции на $g(z)$, кривая 2 – сигнал обратного рассеяния, скорректированный на функцию q_{ik} (кривая 1), полученную с использованием (8), (9), (10).

Эффективность восстановления профиля $\beta(z)$ из реальных сигналов обратного рассеяния иллюстрируют кривые 3 (для скорректированных сигналов) и 4 (для нескорректированных сигналов) на рис. 2 и 3, на которых кривая 2 – заданный профиль $\beta(z)$. Разброс g и β от точки k точке в слоях составляет примерно 20% (соответствует степени неоднородности реальной рассеивающей среды, например: атмосферы, воды и т.п.). Данное обстоятельство позволяет показать работоспособность алгоритма для обработки реальных экспериментальных данных. Кривые 3 и 4 смещены вверх соответственно на 1 и 2 деления для исключения наложения.

На рис. 2 в качестве опорного бралось значение β в точке $z = 1$ км, равное $0,2 \text{ км}^{-1}$ (отличалось от заданного на 10%). Восстановление профиля $\beta(z)$ на рис. 3 проводилось с опорной точки $z = 5$ км

при $\beta = 0,18 \text{ км}^{-1}$ (отличалось от заданного на 20%) по методу Клетта (выражение (2) при задании опорного значения на конце трассы преобразуется к алгоритму, предложенному Клеттом в [4]).

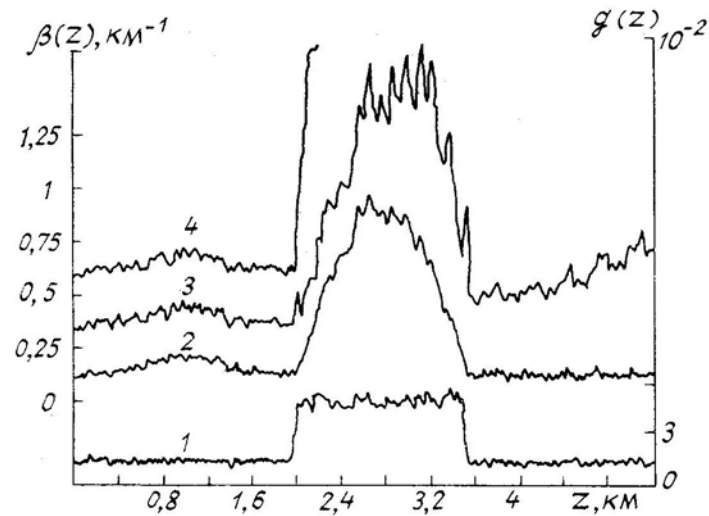


Рис. 2. Результаты восстановления профиля $\beta(z)$ в модельной атмосфере: 1 – заданный профиль лидарного отношения $g(z)$; 2 – заданный профиль показателя ослабления $\beta(z)$; 3 – профиль $\beta(z)$, восстановленный с учетом корректирующей функции $q(z)$, определяемой по (8)-(10); 4 – профиль $\beta(z)$ восстановленный без учета корректирующей функции; в качестве опорного в обоих случаях использовалось значение $\beta = 0,2 \text{ км}^{-1}$ в точке $z = 1,0 \text{ км}$; кривые 3 и 4 смещены вверх соответственно на 1 и 2 деления шкалы

Из обоих рисунков видно, что восстановление с использованием корректирующей функции q_{ik} (кривая 3) дает значительно лучшее совпадение с заданным профилем $\beta(z)$, чем восстановление без корректировки (кривые 4). При этом следует отметить, что более высокая точность восстановления наблюдается при выборе опорной точки в конце трассы зондирования (рис. 3). При выборе же опорной точки в начале трассы зондирования восстановление без корректировки вообще невозможно (кривая 4 рис. 2). Предлагаемая методика с корректировкой сигнала этот недостаток устраняет (восстановление профилей $\beta(z)$ возможно и при получении опорных точек в начале трассы зондирования (кривая 3 рис. 2)).

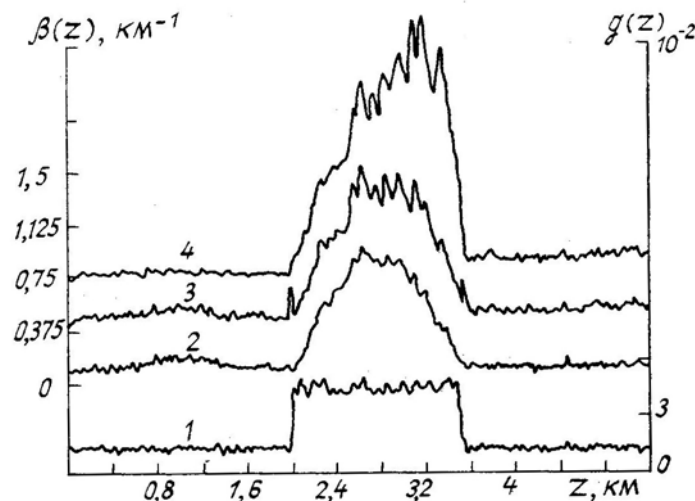


Рис. 3. Результаты восстановления профиля $\beta(z)$ в модельной атмосфере: 1 – заданный профиль лидарного отношения $g(z)$; 2 – заданный профиль показателя ослабления $\beta(z)$; 3 – профиль $\beta(z)$, восстановленный с учетом корректирующей функции $q(z)$, определяемой по (8)-(10); 4 – профиль $\beta(z)$, восстановленный без учета корректирующей функции; в качестве опорного в обоих случаях использовалось значение $\beta = 0,18 \text{ км}^{-1}$ в точке $z = 5,0$; кривые 3 и 4 смещены вверх соответственно на 1 и 2 деления шкалы

На рис. 4 приведены результаты математического моделирования по восстановлению профиля $\beta(z)$ модифицированным методом асимптотического сигнала [3]. Кривые 1 и 2 представляют собой исходные (неоднородные в пределах 10% в слоях) профили соответственно $g(z)$ и $\beta(z)$. Асимптотический сигнал рассчитывался из сигнала обратного рассеяния на участке $[z_i = 4,4; z_{i+1} = 5,4]$. С исполь-

зованием полученного значения асимптотического сигнала по алгоритму [3] определялся профиль $\beta(z)$ как для скорректированных сигналов обратного рассеяния (кривая 3), так и нескорректированных (кривая 4). И в этом случае точность восстановления с использованием коррекции значительно улучшается.

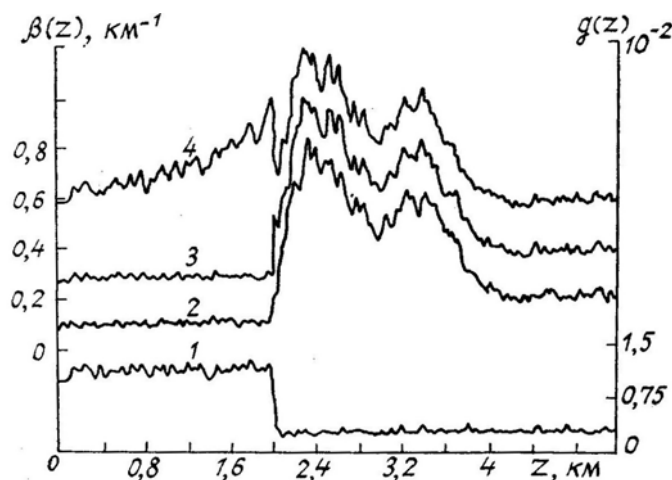


Рис. 4. Результаты восстановления профиля $\beta(z)$ в модельной атмосфере: 1 — заданный профиль лидарного отношения $g(z)$; 2 — заданный профиль показателя ослабления $\beta(z)$; 3 — профиль $\beta(z)$, восстановленный с учетом корректирующей функции $q(z)$, определяемой по (8)-(10); 4 — профиль $\beta(z)$, восстановленный без учета корректирующей функции; опорное значение в обоих случаях определялось на участке $[z_i = 4,4; z_{i+1} = 5,4]$; кривые 3 и 4 смещены вверх соответственно на 1 и 2 деления шкалы

Очевидна практическая значимость предлагаемой методики. Использование ее позволит с самой высокой точностью определять профили $\beta(z)$ на всех участках сред с границами раздела (и на атмосферном, и на гидросферном участках при зондировании с борта носителя; в разных слоях многослойной облачности и т. д.). При этом важно, что опорные значения $\beta(z)$ можно определять на начальных участках трассы зондирования. Более того, использование в данном способе методики определения калибровочных значений из измеряемых сигналов обратного рассеяния, изложенной в [5], дает возможность обработки результатов измерений без проведения независимых дополнительных (опорных) измерений, что в свою очередь позволяет автоматизировать эксперимент и оперативно получать результаты в реальном времени. При этом немаловажно то, что по предлагаемой методике определяется и величина изменения качественного состава рассеивающей среды.

1. Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 185 с.
2. Зуев В.Е., Креков Г.М., Крекова М.М., Наац И.Э. // Вопросы лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1971. С. 3-33
3. Кугейко М.М., Белобровик В.И., Ашкинадзе Д.А., Сергеев Н.М. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО, 1980. Т. 16 № 9. С. 968-973.
4. Klett J.D. // Appl. Optics. 1981. V. 20 P. 211-220.
5. Кугейко М.М., Малевич И.А., Зенченко С.А. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1990. Т. 26. № 2. С. 213-216.

Белорусский государственный университет им. В.И. Ленина

Поступила в редакцию
11 марта 1991 г.

M.M. Kugeiko, I.A. Malevich, D.E. Shipenko. **On the Correction of Lidar Returns when Inverting them on the Optical Characteristics of Scattering Media.**

The method of improving the accuracy of stratified nonhomogeneous media attenuation coefficient reconstruction by correcting a back scattering signals for the lidar ratio variation is proposed. The algorithm for determining the correction coefficient is given. It is shown that absolute value of the correction coefficient characterizes a degree of variation of the media qualitative composition. An efficiency of the method proposed is estimated, the results of numerical experiment are given.