

М. М. Кугейко, И. А. Малевич, Д. М. Оношко

**КОНЦЕПЦИЯ «БЕЗАПРИОРНОСТИ»  
В ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКЕ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

**Введение**

Задача обработки информации в лазерно-локационных измерениях подразумевает не только установление функциональных связей между получаемой информацией и определяемой характеристикой, но и интерпретацию косвенной информации об исследуемом объекте (т. е. решение обратной задачи). Практически во всех случаях задача интерпретации получаемой косвенной информации является многопараметрической и часто некорректной обратной задачей. Вследствие этого для получения количественных значений определяемых характеристик требуется использование априорной информации или допущений об исследуемом объекте, т.е. решение проводится в рамках математической модели объекта исследования. Для некорректных обратных задач устойчивость решения зависит от погрешности получения косвенной информации. В связи с этим в задаче обработки данных лазерно-локационных измерений необходимо разработать такие способы обработки информации, которые позволили бы максимально исключить априорную информацию или допущения об исследуемом объекте, необходимость внесения поправок на фон и дрейф показания приборов, влияние окружающей среды и т. д. Суть данной концепции относительно задачи интерпретации данных лазерно-локационного зондирования заключается в минимальном использовании априорной информации и допущений об исследуемой среде, в максимальном исключении влияния аппаратуры и используемых физических процессов на результаты измерений, в получении опорных (калибровочных) значений определяемых параметров без проведения дополнительных независимых измерений [1].

Для решения задачи определения первичных оптических характеристик лидарными методами подход, основанный на концепции «безаприорности», наиболее полно изложен в [2] и требует дальнейшего рассмотрения проблемы локальной и интегральной калибровки из измеряемых сигналов обратного рассеяния (СОР). Данная проблема связана с информацией о профилях определяемой оптической характеристики  $\varepsilon(r)$  и коррекцией сигналов обратного рассеяния при использовании в ряде методов предположении о постоянстве индикатрисы рассеяния в направлении назад  $\bar{g}_\pi$ . Методика определения прозрачности протяженного участка

$T(r_i, r_j)$  (интегральная калибровка) и значения коэффициента ослабления в точке  $\varepsilon(r_i)$  (локальная калибровка), используемых в качестве опорных значений, основана на измерении накопленных сигналов обратного рассеяния, восстановленных на квадрат расстояния, для перекрывающихся хотя бы на ширину измерительного канала интервалов. Коррекция сигналов обратного рассеяния требует выделения границ качественного изменения состава рассеивающей среды и установления величины коэффициента коррекции.

В теории измерений принято различать прямые, косвенные, совместные и совокупные измерения. Каждая категория измерений связана с определенным способом обработки экспериментальных данных.

При прямых измерениях объект исследования приводят во взаимодействие со средством измерения и по показаниям последнего отсчитывают значение определяемой величины. Порой показания прибора уменьшают на некоторый коэффициент, вводят поправки и т.д.

При косвенных измерениях искомое значение определяемой величины находят на основании известной зависимости между искомой и измеряемой (обычно, путем прямых измерений) величинами. Совместные и совокупные измерения по способам нахождения искомого значения определяемых величин довольно близки: в обоих случаях искомые значения находят путем решения системы уравнений, коэффициенты и отдельные члены в которых получены в результате измерений (обычно, прямых). Основное отличие состоит в том, что при совокупных измерениях одновременно определяют несколько одноименных величин, а при совместных – несколько разноименных.

В локационных оптических задачах одновременное измерение нескольких разноименных величин требует определения величины  $\text{СОР}$  и параметров, определяющих его величину, что практически неосуществимо. Использование совокупных измерений в локационных оптических исследованиях предполагает определение нескольких  $\text{СОР}$ . Регистрация  $\text{СОР}$  на нескольких длинах волн (спектральные измерения), при различных углах рассеяния (нефелометрические измерения), при различной поляризации и т.п., не позволяет получить число уравнений, превышающее или равное числу неизвестных. Действительно, уравнение оптической локации содержит два неизвестных параметра – коэффициент ослабления  $\varepsilon$  и коэффициент обратного рассеяния  $\beta_\pi$ . Их зависимость от  $\lambda$  приводит к тому, что при измерениях  $\text{СОР}$ , например на двух длинах волн, число неизвестных возрастает до четырех, т.к.  $\varepsilon(\lambda_1) \neq \varepsilon(\lambda_2)$ ,  $\beta_\pi(\lambda_1) \neq \beta_\pi(\lambda_2)$  и т.д.

Таким образом, в локационных оптических экспериментах наиболее трудным для воплощения совокупных измерений оказывается поиск особенностей, при которых увеличение измеряемых сигналов не приводит к изменению числа определяемых неизвестных величин. Для решения проблемы получения опорных (калибровочных) значений без проведения дополнительных независимых измерений в [1] предложена идея использования в качестве совокупных измерений СОР от перекрывающихся интервалов зондирования.

Ниже оцениваются алгоритмы получения калибровочных значений  $\varepsilon(r_k)$  и  $T(r_0, r_k)$ , разработанные в рамках концепции «безаприорности» и использующие информацию, которая содержится в самих сигналах обратного рассеяния, в рамках предположений, требуемых для обеспечения работоспособности известных способов интерпретации измеряемых сигналов в зависимости от профиля оптических характеристик для возможных атмосферных и гидросферных ситуаций и на различных участках трасс [3–6]. Обсуждается эффективность использования получаемых по предлагаемым алгоритмам оценок калибровочных значений для различных схем (методов) обработки сигналов [7–10]. Оценивается эффективность коррекции лидарных сигналов на степень изменения качественного состава среды при восстановлении профиля  $\varepsilon(r)$  [3, 7, 10].

## 1. Определение опорных (калибровочных) значений оптических характеристик

Рассмотрим произвольный участок трассы зондирования  $[r_1, r_4]$ . Применяя идею использования совокупных измерений для перекрывающихся интервалов зондирования, запишем выражения для СОР  $I_1 \div I_5$ , соответствующие накоплению их на участках  $[r_1, r_2]$ ,  $[r_1, r_3]$ ,  $[r_2, r_4]$ ,  $[r_3, r_4]$  и  $[r_2, r_3]$ , в виде

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \int_{r_1}^{r_2} S(z) dz = 0.5AP_0 \bar{g}_\pi(r_1, r_2) T^2(0, r_1) [1 - T^2(r_1, r_2)], \\
 I_2 &= \int_{r_1}^{r_3} S(z) dz = 0.5AP_0 \bar{g}_\pi(r_1, r_3) T^2(0, r_1) [1 - T^2(r_1, r_2) T^2(r_2, r_3)], \\
 I_3 &= \int_{r_2}^{r_4} S(z) dz = 0.5AP_0 \bar{g}_\pi(r_2, r_4) T^2(0, r_1) T^2(r_1, r_2) [1 - T^2(r_2, r_3) T^2(r_3, r_4)], \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$I_4 = \int_{r_3}^{r_4} S(z) dz = 0.5AP_0 \bar{g}_\pi(r_3, r_4) T^2(0, r_1) T^2(r_1, r_2) T^2(r_2, r_3) [1 - T^2(r_3, r_4)],$$

$$I_5 = \int_{r_2}^{r_3} S(z) dz = 0.5AP_0 \bar{g}_\pi(r_2, r_3) T^2(0, r_1) T^2(r_1, r_2) [1 - T^2(r_2, r_3)].$$

Запись данных пяти функционалов  $I_1 \div I_5$  обусловлена использованием разбиения анализируемого участка  $[r_1, r_4]$  на три последовательных интервала  $[r_1, r_2]$ ,  $[r_2, r_3]$  и  $[r_3, r_4]$ . Только в этом случае можно получить более двух перекрывающихся интервалов (при разбиении на два участка  $[r_1, r_2]$ ,  $[r_2, r_3]$  перекрывающихся интервалов может быть только два  $[r_1, r_3]$ ,  $[r_1, r_2]$  или  $[r_1, r_3]$ ,  $[r_2, r_3]$ , что не будет удовлетворять решению системы с числом неизвестных более двух). Степень перекрытия интервалов накопления определяется решаемой задачей, т.е. определяется ли локальное значение оптической характеристики, например  $\varepsilon(r)$ , или интегральное значение  $T(r_i, r_j)$ . Минимальное перекрытие соответствует ширине одного канала регистрации СОР.

Поскольку в лазерной локации не решается задача определения истинного профиля регистрируемого сигнала, то критерий задания ширины канала регистрации несколько иной, чем в теории измерений (в частности, не по теореме Котельникова). Если регистрировать соответствующее длительности зондирующего импульса мгновенное значение СОР, то ввиду малости коэффициента обратного рассеяния регистрируемое значение СОР находится во многих ситуациях ниже шумового значения. Поэтому для получения приемлемого отношения сигнал/шум при послышке зондирующего импульса требуется накопление СОР от заданного участка среды, через который проходит данный импульс. Иными словами, задается временной интервал  $\Delta t = \frac{2\Delta r}{c}$ , соответствующий ширине  $\Delta r$  участка накопления СОР (пространственное разрешение). Выбор длительности  $\Delta t$  канала регистрации СОР выбирается из условия превышения половинной разности СОР  $\Delta S = S_{i+1} - S_i$  от двух соседних точек трассы зондирования абсолютной ошибки  $\Delta$  измерения СОР в данных точках, т. е.  $\frac{\Delta S}{2} > \Delta$ . Связь пространственного разрешения  $\Delta r$  (а, значит и ширины канала регистрации СОР  $\Delta t$ ) с параметрами, характеризующими исследуемую среду и погрешность измерительной аппаратуры, имеет вид [11]

$$\Delta r > \frac{S_m}{3.9} \ln(1 - 2\delta S), \quad (2)$$

где  $S_m = \frac{3.9}{\varepsilon}$  – метеорологическая дальность видимости,  $\delta S$  – погрешность измерения СОР. Физический смысл данного выражения заключается в том, что при погрешности измерения сигналов более 50% проводить обработку результатов измерений становится невозможным из-за физической бессмысленности получаемых результатов. При  $\delta S \leq 50\%$  определяется минимальное  $\Delta r$ , с которым можно проводить измерения.

Сказанное выше соответствует и определению элементарного рассеивающего объема в оптике рассеивающих сред, под которым понимается такой объем, в котором количество поглощенного и рассеянного излучения пропорционально размеру объема. Это осуществляется при выполнении следующих требований: а) интенсивность внешнего света в пределах объема остается практически постоянной; б) число частиц достаточно велико, чтобы можно было пользоваться статистикой и применять метод исчисления бесконечно малых. Исходя из вышесказанного линейные размеры такого объема в чистой атмосфере исчисляются сотнями метров, а у мутного коллоидного раствора – долями миллиметра.

Обозначив в (1)  $T^2(r_1, r_2) = a_1$ ,  $T^2(r_2, r_3) = a_2$ ,  $T^2(r_3, r_4) = a_3$ ,  $T^2(0, r_1) = a_0$ ,  $0.5AP_0 = B$ ,  $g_\pi(r_1, r_2) = x_1$ ,  $g_\pi(r_1, r_3) = x_2$ ,  $g_\pi(r_2, r_4) = x_3$ ,  $g_\pi(r_3, r_4) = x_4$ ,  $g_\pi(r_2, r_3) = x_5$ , запишем (1) в виде

$$\begin{aligned} I_1 &= Bx_1a_0(1 - a_1), \\ I_2 &= Bx_2a_0(1 - a_1a_2), \\ I_3 &= Bx_3a_0a_1(1 - a_2a_3), \\ I_4 &= Bx_4a_0a_1a_2(1 - a_3), \\ I_5 &= Bx_5a_0a_1(1 - a_2), \end{aligned} \quad (3)$$

Очевидно, что корректного решения системы уравнений  $I_i$  ( $i = 1, \dots, 5$ ) относительно  $a_i$  ( $i = 0, \dots, 3$ ) не существует, т.к. число неизвестных  $a_i$ ,  $x_i$  превышает число используемых уравнений. Решения системы (3) получены в [1, 6] при использовании некоторых допущений о среде по трассе зондирования. Можно выделить три следующих варианта модели среды.

**Модель среды  $a_1 \approx a_3$ .** В этом случае решение относительно  $a_1$  можно получить, рассматривая функционалы  $I_2$  и  $I_3$  системы (3):

$$a_1 = \frac{I_3x_3}{I_2x_2}. \quad (4)$$

Используемое допущение  $a_1 \approx a_3$  означает примерное равенство прозрачностей участков  $[r_1, r_2]$ ,  $[r_3, r_4]$ . Для малых (непротяженных) участков ( $[r_i, r_j] \rightarrow 0$ ) практически всегда данное условие выполняется. Таким образом, если участки  $[r_1, r_2]$ ,  $[r_3, r_4]$ , будут соответствовать ширине канала регистрации сигнала обратного рассеяния (стробу), обычно малому, то получим

$$\begin{aligned} T^2(r_1, r_2) &= a_1 = \frac{I_3}{I_2}, \\ \varepsilon(\Delta r) &= -0.5 \ln \left( \frac{I_3}{I_2} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

так как отношение  $\frac{x_3}{x_2} \approx 1$ , т. е. для протяженных перекрывающихся участков трассы зондирования  $[r_1, r_3]$ ,  $[r_2, r_4]$ , отличающихся на величину  $\Delta r \rightarrow 0$ , среднее значение лидарного отношения  $g_\pi(r_1, r_3) \approx g_\pi(r_2, r_4)$  для большинства встречающихся реальных ситуаций. Не будет выполняться условие  $x_3/x_2 \approx 1$  и особенно  $a_1 \approx a_3$  только в случае попадания участка  $[r_1, r_3]$  или  $[r_2, r_4]$  на границу раздела двух различных рассеивающих сред (границу резкого изменения состава и концентрации рассеивающего вещества).

Получаемое из (5) значение коэффициента ослабления на участке  $\Delta r$  можно использовать в качестве опорного (калибровочного) для методик расчета оптических характеристик, требующих знания локальных опорных значений (при  $\Delta r \rightarrow 0$ ). Последовательное смещение функционалов  $I_2$ ,  $I_3$  на величину пространственного разрешения можно использовать для получения и профилей  $\varepsilon(\Delta r)$  на участке трассы зондирования.

При использовании (5) для определения прозрачности  $a_1$  протяженного участка  $[r_1, r_2]$  (для  $(r_2 - r_1) \rightarrow \infty$ ) предположения  $a_1 \approx a_3$ ,  $\frac{x_3}{x_2} \approx 1$  являются более жесткими (менее выполнимыми), чем для случая  $(r_2 - r_1) \rightarrow 0$ . Действительно, равенство прозрачности для двух разнесенных протяженных участков трассы зондирования может выполняться для значительно меньшего числа атмосферных и гидросферных ситуаций, чем равенство прозрачности малых участков.

Естественно получение алгоритмов интегральной калибровки (определение прозрачности протяженного участка) при использовании не жестких предположений об  $a_1$  и  $a_3$ . Если рассматривать функционалы  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$  системы (3), то можно получить выражение для  $a_2$ :

$$a_2 = \frac{x_1 x_3}{x_2 x_4} \frac{I_2 I_4}{I_1 I_3}. \quad (6)$$

Полученное выражение (6) наиболее полно удовлетворяет ситуации при  $(r_2 - r_1) \rightarrow 0$ ,  $(r_4 - r_3) \rightarrow 0$ . При этом  $T(r_1, r_2)$ ,  $T(r_3, r_4)$  стремятся к единице практически в любых атмосферных и гидросферных ситуациях (а это и означает выполнение условия  $a_1 \approx a_3$ ). Равно единице и отношение  $\frac{(x_1 x_3)}{x_2 x_4}$  во всех случаях, соответствующих случайному процессу с некор-

релированными значениями  $\varepsilon$ ,  $g_\pi$  по исследуемой трассе зондирования.

Таким образом, если лидарные отношения по исследуемой квазистационарной трассе являются независимыми или слабо коррелированными величинами (а это соответствует множеству атмосферных и гидросферных трасс), то  $\frac{(x_1 x_3)}{x_2 x_4} \approx 1$ . С учетом этого (6) принимает вид

$$T^2(r_2, r_3) = a_2 = \frac{I_2 I_4}{I_1 I_3}. \quad (7)$$

Получаемые из (7) значения прозрачности можно использовать в качестве опорных (калибровочных) для известных методик, требующих знания интегральных опорных значений прозрачности протяженных участков трассы (вариант решения проблемы интегральной калибровки). Используемые при этом допущения в значительной степени менее жесткие, чем для варианта локальной калибровки (5), т.к. не требуют предположений или допущений о поведении лидарного отношения по трассе.

**Модель среды  $a_2 \approx a_3$ .** Решение системы уравнений из функционалов  $I_i$  возможно и с использованием предположения  $a_2 \approx a_3$ . В этом случае участки  $a_2$  и  $a_3$  должны располагаться в конце протяженного участка и быть малыми, т.е.  $(r_3 - r_2) \rightarrow 0$ ,  $(r_4 - r_3) \rightarrow 0$ . С учетом предположения  $a_2 \approx a_3$  решение системы уравнений для функционалов  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_4$ ,  $I_5$  (используемое предположение выполняется практически для всех атмосферных и гидросферных ситуаций за исключением случая попадания одного из участков на границу раздела сред) имеет вид

$$a_1 = T^2(r_1, r_2) = \frac{mI_2 - I_1}{mI_2 - \frac{nI_1 I_4}{I_5}}, \quad (8)$$

где  $m = \frac{\overline{g_\pi(r_1, r_2)}}{g_\pi(r_1, r_3)}$ ,  $n = \frac{\overline{g_\pi(r_2, r_3)}}{g_\pi(r_3, r_4)}$ .

Для протяженных участков  $[r_1, r_2]$ ,  $[r_1, r_3]$  рассеивающих сред  $m$  практически во всех ситуациях с большой точностью равно единице, даже в случае границы раздела сред на  $[r_1, r_2]$ . Сложнее обстоит дело с выбором участков  $[r_2, r_3]$ ,  $[r_3, r_4]$  с равными средними значениями  $g_\pi(r)$  для двух соседних участков трассы. Однако в рамках используемых предположений о том, что  $g_\pi(r) = \text{const}$  или медленно меняющаяся от точки к точке функция, будет равна единице и величина  $n$ . Выражение для прозрачности участка  $[r_1, r_2]$  в этом случае имеет вид

$$T^2(r_1, r_2) = \frac{I_2 - I_1}{I_2 - \frac{I_1 I_4}{I_5}}, \quad (9)$$

и его можно использовать для определения опорного (калибровочного) значения в методиках с интегральной калибровкой.

В случае неоднородных рассеивающих сред (с большим разбросом  $g_\pi(r)$ ) применение алгоритма (9) определяется наличием участков, удовлетворяющих условию:

$$\delta\beta_\pi < \exp(2\varepsilon\Delta r) - 1, \quad (10)$$

следующему из необходимости получения корректного результата (прозрачность не должна быть больше 1 или меньше 0). Здесь  $\delta\beta_\pi = \frac{\Delta\beta_\pi}{\beta_\pi}$  -

степень неоднородности среды.

**Модель среды  $a_1 \approx a_2$ .** Рассмотренный алгоритм (9) позволяет определять прозрачность протяженных начальных участков трасс зондирования. Аналогичный результат для прозрачности конечных участков (соответствует более устойчивому решению задачи восстановления профилей оптических характеристик) можно получить, если предположить, что  $a_1 \approx a_2$ . Участки  $[r_1, r_2]$ ,  $[r_2, r_3]$ , соответствующие функционалам  $I_1$ ,  $I_5$ , должны быть при этом малыми ( $[r_1, r_2] \rightarrow 0$ ,  $[r_2, r_3] \rightarrow 0$ ). Относительно  $a_1$ ,  $a_3$  решается система, в которую входят функционалы  $I_1$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ ,  $I_5$  [12]:

$$a_3 = T^2(r_3, r_4) = \frac{x_3 I_4 - \frac{(x_1 x_4 I_3 I_5)}{(x_5 I_1)}}{(x_3 I_4 - x_4 I_3) \left( \frac{x_1 I_5}{x_5 I_1} \right)}. \quad (11)$$

В рамках используемого известными методами предположения о том, что  $g_\pi(r) = \text{const}$  или медленно изменяющаяся от точки к точке функция, выражение (11) преобразуется к виду



$$T^2(r_3, r_4) = \frac{I_4 - \frac{I_3 I_5}{I_1}}{(I_4 - I_3) \frac{I_5}{I_1}}. \quad (12)$$

Выражение (12), таким образом, также можно использовать для проведения интегральной калибровки в методах восстановления оптических характеристик при допущении о постоянстве лидарного отношения по исследуемой трассе. В то же время, так как на вид полученного только что выражения (12) не влияют границы раздела сред на  $[r_3, r_4]$ , то его можно эффективно применять при определении прозрачности и по глассе.

## 2. Коррекция лидарных сигналов на степень неоднородности среды

Рассмотрим случай лидарного зондирования двухслойной рассеивающей среды (например, атмосфера–облако). Относительное изменение индикатрисы рассеяния в направлении назад от слоя  $i$  к слою  $j$  можно выразить через параметр  $q_{ij} = \frac{g_{\pi j}}{g_{\pi i}}$ , где  $g_{\pi i}$ ,  $g_{\pi j}$  – соответственно, средние значения индикатрисы рассеяния в направлении назад в слоях  $i$  и  $j$  [1, 2, 6, 8, 9].

Выражение (12) с учетом связи между  $\beta_{\pi}(r)$  и  $\varepsilon(r)$  можно записать в виде

$$\psi(r) = \varepsilon(r) \exp \left\{ -2 \int_{r_0}^r \varepsilon(z) dz \right\},$$

где  $\psi(r) = P(r)r^2 A^{-1} g_{\pi}^{-1} T^{-2}(0, r_0)$  – экспериментально определяемая функция. Сравним экспериментально определяемые функции для произвольной точки  $r$  в слоях  $i$  и  $j$ , т. е.

$$\begin{aligned} \psi_i(r) &= S(r)C_i, \\ \psi_j(r) &= S(r)C_j, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $S(r) = P(r)r^2$ ,  $C_i = A^{-1} g_{\pi i}^{-1}(r) T^2(0, r_0)$ ,  $C_j = A^{-1} g_{\pi j}^{-1}(r) T^2(0, r_0)$ .

Из (13) следует, что при переходе от слоя  $i$  к слою  $j$  происходит изменение функции  $\psi(r)$  за счет изменения индикатрисы рассеяния в направлении назад. Величина этого изменения равна  $q_{ij} = \frac{g_{\pi j}}{g_{\pi i}}$ , т. к.

$C_j = \frac{C_i}{g_{ij}}$ . Это означает, что при расчете  $\varepsilon(r)$  в слое  $j$  необходимо произво-

дить изменение константы  $C_i$ , используемой для слоя  $i$ , на величину  $q_{ij}$ . Физический смысл коррекции состоит в изменении величины СОР до такого уровня, который соответствует случаю постоянства  $g_{\pi}(r)$  на трассе (неизменности микроструктуры рассеивателей). При этом величина коэффициента коррекции не будет априорно вносимой, а определяется исходя из анализа поведения профиля сигнала. Таким образом, для корректного использования методик, требующих предположения  $\overline{g_{\pi j}} = \text{const}$ , в случае многослойных сред необходимо изменение уровня эхо-сигнала при используемом предположении, и задача более корректного восстановления  $\varepsilon(r)$  в случае одночастотного зондирования многослойных сред определяется заданием относительного изменения индикатрисы рассеяния в направлении назад в выделенных слоях, выражаемого через коэффициент коррекции  $q_{ij}$ .

Для получения алгоритма определения величины коэффициента коррекции  $q_{ij}$  также используются совокупные измерения, основанные на измерении СОР, накопленных на перекрывающихся интервалах зондирования. Согласно [1, 6], для функционалов вида  $I_6 = I(r_i, r_i + \Delta r_i)$ ,  $I_7 = I(r_i + \Delta r_i, r_i + 2\Delta r_i)$  (слой «атмосфера») и  $I_8 = I(r_j, r_j + \Delta r_j)$ ,  $I_9 = I(r_j + \Delta r_j, r_j + 2\Delta r_j)$  (слой «облако») имеем

$$I_6 = \int_{r_i}^{r_i + \Delta r_i} S(z) dz, \quad I_7 = \int_{r_i + \Delta r_i}^{r_i + 2\Delta r_i} S(z) dz, \quad I_8 = \int_{r_j}^{r_j + \Delta r_j} S(z) dz, \quad I_9 = \int_{r_j + \Delta r_j}^{r_j + 2\Delta r_j} S(z) dz,$$

где  $r_i, r_j$  – произвольные точки в слоях  $i, j$ ,  $\Delta r_i, \Delta r_j$  – произвольные и не обязательно равные). При выполнении внутри слоев  $i, j$  условий

$$\begin{aligned} \overline{g_{\pi}}(r_i, r_i + \Delta r_i) &= \overline{g_{\pi}}(r_i + \Delta r_i, r_i + 2\Delta r_i) = \overline{g_{\pi i}}, \\ \overline{g_{\pi}}(r_j, r_j + \Delta r_j) &= \overline{g_{\pi}}(r_j + \Delta r_j, r_j + 2\Delta r_j) = \overline{g_{\pi j}}, \\ T(r_i, r_i + \Delta r_i) &= T(r_i + \Delta r_i, r_i + 2\Delta r_i) = T(\Delta r_i), \\ T(r_j, r_j + \Delta r_j) &= T(r_j + \Delta r_j, r_j + 2\Delta r_j) = T(\Delta r_j) \end{aligned} \quad (14)$$

можно записать следующую систему:

$$\begin{aligned} I_6 &= 0.5AP_0 \overline{g_{\pi i}} T^2(0, r_i) [1 - T^2(\Delta r_i)], \\ I_7 &= 0.5AP_0 \overline{g_{\pi i}} T^2(0, r_i) T^2(\Delta r_i) [1 - T^2(\Delta r_i)], \\ I_8 &= 0.5AP_0 \overline{g_{\pi j}} T^2(0, r_j) T^4(\Delta r_j) T^2(r_j + 2\Delta r_j, r_j) [1 - T^2(\Delta r_j)], \end{aligned} \quad (15)$$

$$I_9 = 0.5AP_0 \overline{g_{\pi j}} T^2(0, r_i) T^4(\Delta r_i) T^2(r_i + 2\Delta r_i, r_j) T^2(\Delta r_j) [1 - T^2(\Delta r_j)].$$

Её решение относительно  $q_{ij}$  запишется как

$$q_{ij} = \frac{\overline{g_{\pi j}}}{g_{\pi i}} = \left[ \frac{I_8}{I_7} \right]^2 \frac{I_6 - I_7}{I_8 - I_9} T^{-2}(r_i + 2\Delta r_i, r_j). \quad (16)$$

В случае слоисто-однородных рассеивающих сред с резкими границами раздела сред для соседних слоев величина  $T^{-2}(r_i + 2\Delta r_i, r_{i+1}) \approx 1$  и выражение (16) упрощается

$$q_{i,i+1} = \frac{\overline{g_{\pi i+1}}}{g_{\pi i}} = \left[ \frac{I_8}{I_7} \right]^2 \frac{I_6 - I_7}{I_8 - I_9}. \quad (17)$$

Как видно из (16) и (17), определение  $q_{i,i+1}$  для прилегающих друг к другу слоев с резкими (непротяженными) границами раздела не требует знания величины  $T^2(r_i + 2\Delta r_i, r_{i+1})$ . Для протяженных границ раздела требуется определение прозрачности участков, включающих границы раздела. Поскольку в переходных участках слоев  $g_{\pi}(r)$  непостоянно, алгоритм определения  $T^2(r_i + 2\Delta r_i, r_j)$  должен быть устойчивым к разбросу индикатрисы  $g_{\pi}(r)$ . Кроме того, в случае протяженных границ раздела непосредственное использование идеи коррекции СОР (17) внутри переходных слоев методически невозможно из-за невыполнения условий (14). Таким образом, идея коррекции в рассмотренном выше виде для переходных слоев неприменима.

Эффективность использования коррекции лидарных сигналов (17) в многослойных слоисто-однородных рассеивающих средах с резкими границами раздела показана в работе [7] посредством численного моделирования восстановления профиля коэффициента ослабления. Ниже (рис. 1, 2) приводятся результаты моделирования для трехслойной рассеивающей среды с резкими границами раздела сред.

По заданным профилям  $\varepsilon(r)$  и лидарного отношения  $g_{\pi}(r)$  в приближении однократного рассеяния по (1) рассчитывался отраженный назад сигнал, далее на него накладывалась случайная ошибка в пределах 3%. Кривая 1 на рис. 1 – заданный профиль  $g_{\pi}(r)$ , а кривая 2 – заданный профиль  $\varepsilon(r)$ . Восстановление коэффициента ослабления  $\varepsilon^*(r)$  (кривая 3) для произвольных точек  $r$  заданной трассы проводилось методом последовательных слоев. Калибровочная точка  $r_k$  задавалась на начальном участке трассы зондирования и значение коэффициента ослабления в ней предполагалось известным. Как видно из рис. 2, значительное различие в значениях задаваемого профиля  $\varepsilon(r)$  (кривая 2) и восстановленного  $\varepsilon^*(r)$

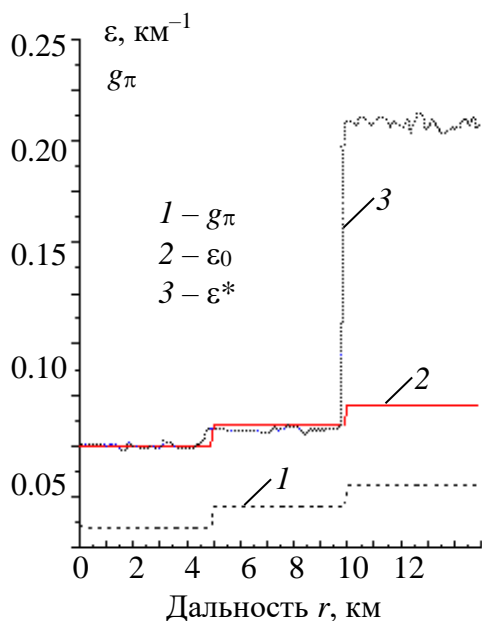


Рис.1. Результаты восстановления коэффициента ослабления  $\varepsilon^*(r)$  (кривая 3) методом последовательных слоев. Кривая 1 – заданный профиль  $g_\pi(r)$ , кривая 2 – заданный профиль  $\varepsilon(r)$ . Коррекция СОР проводилась по первому скачкообразному изменению оптических характеристик

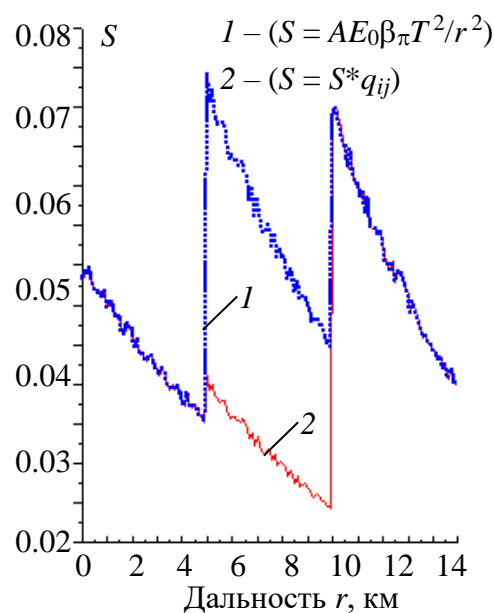


Рис.2. Профили СОР. Кривая 1 – рассчитанный по (1) СОР, умноженный на квадрат расстояния; кривая 2 – тот же СОР, но с коррекцией по первому скачку в изменении качественного состава рассеивающей среды (участок трассы 5–10 км)

(кривая 3) наблюдается на последнем участке трассы, где погрешность восстановления достигает величины до 180 %; тогда как на начальном участке, где задавалось калибровочное значение  $\varepsilon(r_k)$ , и на среднем участке, где проводилась коррекция СОР (коэффициент коррекции  $q_{ij}$  рассчитывался по формуле (17)), погрешность восстановления незначительна.

Соответствующие СОР приведены на рис. 2. Кривая 1 отображает рассчитанный по (1) СОР, умноженный на квадрат расстояния; а кривая 2 – тот же СОР, но с коррекцией по первому скачку в изменении качественного состава рассеивающей среды (участок трассы 5 – 10 км).

Рис. 3 иллюстрирует случай восстановления профиля  $\varepsilon(r)$  (кривая 3) при заданных профилях  $g_\pi(r)$  (кривая 1) и  $\varepsilon(r)$  (кривая 2) в случае наложения на рассчитанный СОР случайной ошибки в пределах 3%. Опорное калибровочное значение  $\varepsilon(r_k)$  для метода последовательных слоев считалось известным в первом слое при наличии 10% случайной ошибки и коррекция СОР проводилась только для второго участка с перепадом  $g_\pi(r)$ .

Необходимо отметить, что решение проблемы калибровки для многослойных сред с изменяющимся от слоя к слою качественным составом

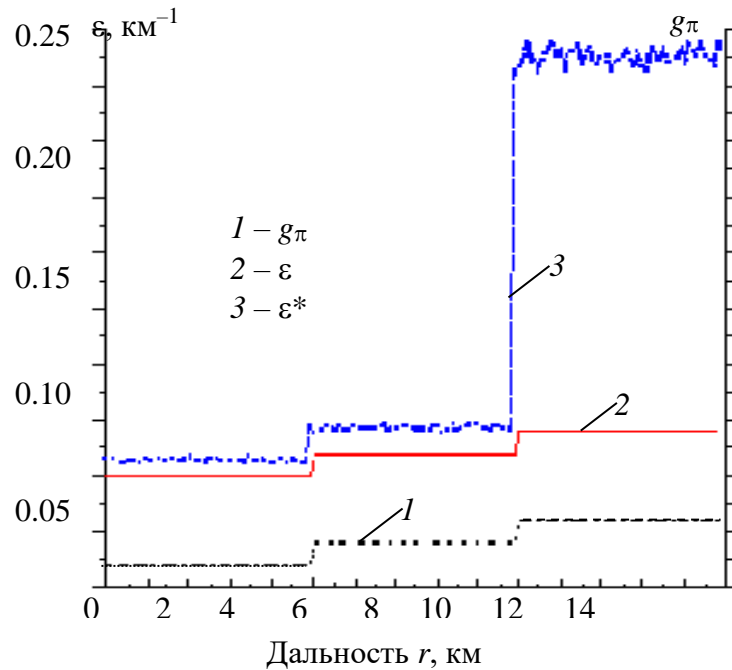


Рис. 3. Результаты восстановления коэффициента ослабления  $\varepsilon^*(r)$  (кривая 3) методом последовательных слоев при наложении на СОР случайной ошибки в пределах 3 %. Кривая 1 – заданный профиль  $g_\pi(r)$ ; кривая 2 – заданный профиль  $\varepsilon(r)$ . Коррекция СОР проводилась по первому скачкообразному изменению оптических характеристик

усложняется необходимостью установления опорных значений измеряемых параметров внутри каждого слоя. Однако, как видно из вышеизложенного, для тех атмосферных и гидросферных ситуаций, где применимо приближение слоисто-неоднородных сред с резкими границами, использование коррекции СОР (17) позволяет выбирать алгоритм определения опорного (калибровочного) значения оптической характеристики из измеряемого СОР в любом из слоев. При этом используется тот же СОР, который измеряется для определения профиля оптических характеристик по исследуемой трассе и не требуется установление опорных значений определяемой характеристики внутри каждого слоя [7].

### 3. Метод определения оптических характеристик переходных участков слоисто-неоднородных рассеивающих сред

Анализ эффективности существующих методов определения оптических характеристик рассеивающих сред, проведенный выше, показывает, что восстановление профилей коэффициентов ослабления в многослойных слоисто-неоднородных рассеивающих средах с протяженными (размытыми) переходными участками между слоями требует учета ослабления СОР на этих участках в алгоритме определения коэффициента кор-

рекции на степень неоднородности среды. Из-за невыполнения условий равенства средних значений  $g_{\pi}(\Delta r_i)$  и  $T^2(\Delta r_i)$  в соседних точках использование известного алгоритма коррекции для определения профиля коэффициента ослабления внутри переходных участков становится невозможным. Требуется решения и проблема установления границ переходных участков.

Рассматриваемое ниже решение задачи определения профилей оптических характеристик неоднородных рассеивающих сред основано на выделении границ неоднородности из анализа СОР, коррекции сигналов на степень изменения качественного состава рассеивающей среды в слоях с учетом ослабления на переходных участках, интерполяции сигналов на участках раздела (переходных участках) слоев.

**Прозрачность участка границы раздела сред.** Необходимость учета ослабления СОР на протяженных участках раздела сред при использовании коэффициента коррекции на степень неоднородности среды (16) требует определения прозрачности данного участка раздела  $T^2(r_i, r_j)$ . Поскольку переходные участки раздела слоев в общем случае не удовлетворяют условию постоянства ни качественного состава (характеризуемого  $g_{\pi}(r)$ ), ни количественного (характеризуемого  $\varepsilon(r)$ ), алгоритм определения  $T^2(r_i, r_j)$  должен быть устойчивым к разбросу этих характеристик на участке  $[r_i, r_j]$ .

Будем исходить из уравнения оптической локации в приближении однократного рассеяния (1). Рассмотрим произвольный участок трассы зондирования  $[r_1, r_4]$ . Здесь  $[r_1, r_2]$  соответствует участку накопления сигналов в рассеивающей среде до переходного слоя,  $[r_3, r_4]$  – участку накопления после переходного слоя, а  $[r_2, r_3]$  – участку накопления в переходном слое. Запишем выражения для функционалов  $I_2, I_3, I_5$ , соответствующие накоплению СОР на участках  $[r_1, r_3], [r_2, r_4]$  и  $[r_2, r_3]$ :

$$\begin{aligned} I_2 &= Bx_2 a_0 (1 - a_1 a_2), \\ I_3 &= Bx_3 a_0 a_1 (1 - a_2 a_3), \\ I_5 &= Bx_5 a_0 a_1 (1 - a_2). \end{aligned} \quad (18)$$

Выбор участков обусловлен следующими соображениями. Так как для получаемого алгоритма  $T^2(r_i, r_j)$  требуется устойчивость к разбросу  $g_{\pi}(r)$  на участке  $[r_i, r_j]$ , то степень перекрытия всех используемых интервалов накопления  $I_2, I_3, I_5$  выбирается максимальной (отличие  $I_2$  и  $I_3$  от  $I_5$  на ширину канала регистрации). Поэтому при протяженном участке  $[r_2, r_3]$ , отличающемся на ширину одного канала от  $[r_1, r_3]$  и  $[r_2, r_4]$  ( $[r_1, r_2] \rightarrow 0, [r_3, r_4] \rightarrow 0$ ), можно считать выполнимыми следующие условия:  $\overline{g_{\pi}(r_1, r_3)} \approx \overline{g_{\pi}(r_2, r_3)}, \overline{g_{\pi}(r_2, r_4)} \approx \overline{g_{\pi}(r_2, r_3)}$ .

Очевидно, решение системы уравнений  $I_i$  ( $i = 2,3,5$ ) относительно  $a_i$  ( $i = 0, \dots, 3$ ) не существует, т. к. число неизвестных  $a_i, x_i$  превышает число используемых уравнений. Получим решение системы (18) при использовании некоторых допущений о среде по трассе зондирования. Предположим, что  $a_1 \approx a_3$ . В этом случае существует возможность получения решения системы функционалов (18) относительно прозрачности протяженного участка исследуемой трассы  $a_2$ .

Рассмотрим отношение функционалов  $I_2$  и  $I_3$  системы (18):

$$\frac{I_2}{I_3} = \frac{x_2}{x_3} \frac{1 - a_1 a_2}{a_1 (1 - a_1 a_2)} \Big|_{x_2 \approx x_3, a_2 \approx a_3, \approx \frac{1}{a_1}}. \quad (19)$$

Используемое допущение  $a_1 \approx a_3$  означает примерное равенство прозрачностей участков  $[r_1, r_2]$ ,  $[r_3, r_4]$ . Для малых (непротяженных) участков ( $[r_1, r_2] \rightarrow 0$ ,  $[r_3, r_4] \rightarrow 0$ ) данное условие практически всегда выполняется ( $T(r_1, r_2) \rightarrow 1$ ,  $T(r_3, r_4) \rightarrow 1$ ). Далее рассмотрим отношение функционалов  $I_2/I_5$ :

$$\frac{I_2}{I_5} = \frac{x_2}{x_5} \frac{1 - a_1 a_2}{a_1 (1 - a_2)} \Big|_{x_2 \approx x_5, \approx \frac{1 - a_1 a_2}{a_1 (1 - a_2)}}. \quad (20)$$

Подставляя (19) в выражение (20) и решая его относительно прозрачности протяженного переходного участка  $[r_2, r_3]$ , получаем

$$T^2(r_2, r_3) = a_2 = \frac{I_2(I_5 - I_3)}{I_3(I_5 - I_2)}. \quad (21)$$

Выражение (21) также может быть использовано для получения интегральных калибровочных значений в методах интерпретации данных лидарного зондирования.

Результаты численного математического моделирования алгоритма (21) приведены на рис. 4, 5. Кривые 1 и 2 на рисунках – заданные профили  $g_\pi(r)$  и  $\varepsilon(r)$  соответственно, кривая 3 – рассчитанное значение прозрачности  $T(r_i, r_j) \approx \exp\left[\bar{\varepsilon}(r_i, r_j)(r_j - r_i)\right]$ , кривая 4 – восстановленное по (21) значение прозрачности. Вначале по заданным профилям  $g_\pi(r)$  и  $\varepsilon(r)$  согласно (1) рассчитывался профиль СОР, далее на полученный СОР налагалась случайная ошибка в пределах 3% и рассчитывались значения функционалов  $I_2, I_3, I_5$  (18). Рассчитанные функционалы использовались для определения прозрачности  $T(r_2, r_3)$ .

Результаты моделирования, приведенные на рис. 4, получены при последовательном смещении точек  $r_1, r_2, r_3, r_4$  на величину строга  $\Delta r$  по трассе зондирования, а на рис. 5 – для случая, когда смещение проводи-

лось только для точек  $r_3, r_4$ . Как видно из рис. 4, 5, на участках, не включающих границ перепада в профилях  $g_\pi(r)$  и  $\varepsilon(r)$ , погрешность восстановления достигает единиц процентов.

Очевидным достоинством полученного выше алгоритма (21) определения прозрачности (интегрального калибровочного значения), по сравнению с описанными ранее в п. 2., следует считать тот факт, что при использовании функционалов  $I_2, I_3$  и  $I_5$ , соответствующих накоплению СОР на максимально перекрывающихся длинных участках  $[r_1, r_3], [r_2, r_4]$  и  $[r_2, r_3]$  трассы происходит «сглаживание» влияния индикатрисы рассеяния в направлении назад на значение определяемого интегрального калибровочного значения, что, в свою очередь, обуславливает устойчивость получаемого значения  $T[r_2, r_3]$  к наличию на трассе зондирования неоднородностей и флуктуаций оптических и микрофизических характеристиках. Данный алгоритм устойчив и к наличию слоев с резко выделенным изменением оптических характеристик (например, выбросов труб промышленных предприятий при зондировании городского аэрозоля) на участках определения прозрачности. Это следует из того, что данные слои одновременно включаются в функционалы  $I_i$  для протяженных участков, отличающихся на величину пространственного разрешения, обычно небольшую ( $\Delta r \rightarrow 0$ ), и средние значения  $g_\pi(r_i, r_j), g_\pi(r_i, r_j + \Delta r)$  этих участков практически равны.

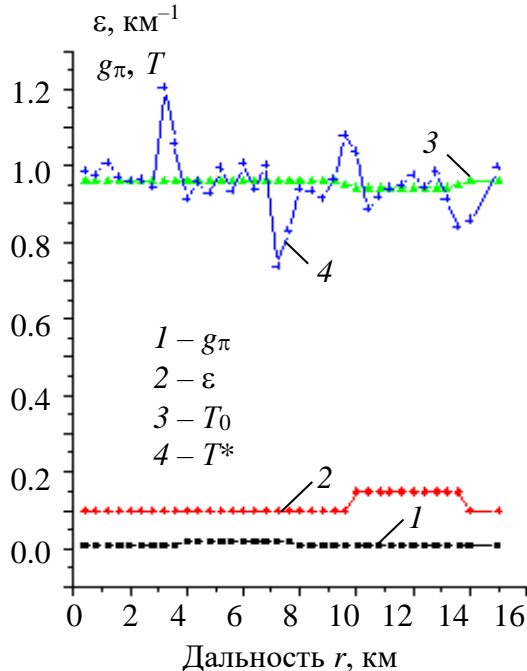


Рис. 4. Результаты восстановления  $\varepsilon(r)$  при последовательном смещении точек  $r_1, r_2, r_3, r_4$  на величину  $\Delta r$

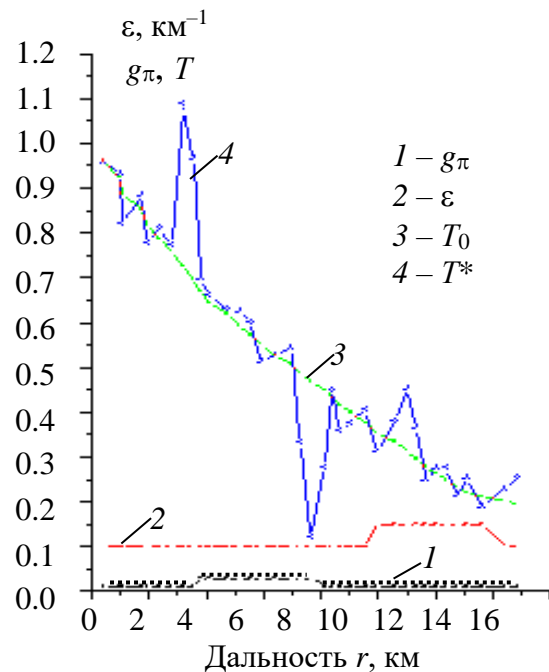


Рис. 5. Результаты восстановления  $\varepsilon(r)$  при последовательном смещении точек  $r_2, r_3, r_4$  на величину  $\Delta r$  ( $r_1$  фиксирована)



Полученный выше алгоритм определения прозрачности не содержит ни аппаратурных констант, ни зависимости от энергии зондирующих импульсов. Из этого следует устойчивость алгоритма к разбросу энергии зондирующих импульсов от одной посылки к другой, исключаются погрешности определения аппаратурных констант.

Измеряемые функционалы  $I_i$  в изложенном выше алгоритме (21) используется в виде отношения соседних, отличающихся на величину  $\Delta r$ , отсчетов. Вклады многократного рассеяния  $C_i$  для соседних отсчетов, отличающихся на величину  $\Delta r \rightarrow 0$ , практически одинаковы, что с учетом использования их в виде отношений приводит к устойчивости к вкладу многократного рассеяния в регистрируемый СОР. Незначительность влияния вклада многократного рассеяния в измеряемые сигналы в алгоритме расчета оптических характеристик, использующего сигналы в виде относительного хода соседних, отличающихся на  $\Delta r$ , отсчетов, отмечалось в работах других авторов.

Предлагаемый алгоритм определения прозрачности использует информацию, которая содержится в самих СОР, и не требует более широкого (чем для известных методов определения профилей оптических характеристик по трассе) привлечения различного рода упрощающих и модельных представлений об оптических свойствах исследуемой среды. Действительно, алгоритм требует равенства прозрачностей на коротких ( $\Delta r \rightarrow 0$ ) участках среды и равенства средних значений  $g_\pi(r_i, r_j)$ ,  $g_\pi(r_i, r_j + \Delta r)$  на протяженных участках, незначительно отличающихся по длине ( $\Delta r \rightarrow 0$ ). Это требование менее жесткое по сравнению с требованиями однородности среды или равенства  $g_\pi(r)$  и  $\varepsilon(r)$  в соседних слоях (при этом необходимо знание начального значения  $\varepsilon(r)$  и априорная информация о поведении  $g_\pi(r)$  между слоями), присущими так называемым численным методам решения уравнения оптической локации. То же можно сказать и о методах, основанных на аналитическом решении, требующих неизменности  $g_\pi(r)$  по всей трассе или знания функциональной связи между  $g_\pi(r)$  и  $\varepsilon(r)$ . Более того, отсутствие в предлагаемом алгоритме ограничений на длины участков определения функционалов  $I_i$  повышает его устойчивость к влиянию измерительных погрешностей.

Алгоритм (21) требует использования минимальных предположений, а именно, примерного равенства прозрачности участков для двух малых участков (при  $\Delta r \rightarrow 0$ ) исследуемой среды. Практически это означает равенство прозрачности участков, соответствующих стробу (каналу) измерительной аппаратуры, что соблюдается даже при значительных разбросах оптических характеристик ( $\exp\{-2\varepsilon\Delta r\} \approx 1$  при  $\Delta r \rightarrow 0$  и значитель-

ном разбросе  $\varepsilon(r)$ ). Так, например, при  $\Delta r = 0.1$  км и  $\varepsilon = 0.1; 0.01$  км<sup>-1</sup>,  $T(\Delta r)$  равны 0.998 и 0.9998 соответственно.

**Коэффициент коррекции.** Как было показано выше, использование методики коррекции СОР позволяет учитывать в формируемом значении СОР степень неоднородности среды из-за изменения ее качественного состава. Однако в случае слоисто-неоднородных сред с переходными (размытыми) участками между слоями использование выражения (17) для коэффициента коррекции становится затруднительным. Это обусловливается невозможностью выделения внутри переходного слоя соседних участков среды с установившимися значениями  $g_{\pi}(r)$  и  $\varepsilon(r)$ , т.е. невозможностью обеспечить выполнение условий применимости формулы (17):

$$\begin{aligned} \overline{g_{\pi}(r_i, r_i + \Delta r_i)} &= \overline{g_{\pi}(r_i + \Delta r_i, r_i + 2\Delta r_i)} = \overline{g_{\pi i}}, \\ \overline{g_{\pi}(r_j, r_j + \Delta r_j)} &= \overline{g_{\pi}(r_j + \Delta r_j, r_j + 2\Delta r_j)} = \overline{g_{\pi j}} \end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned} T(r_i, r_i + \Delta r_i) &= T(r_i + \Delta r_i, r_i + 2\Delta r_i) = T(\Delta r_i), \\ T(r_j, r_j + \Delta r_j) &= T(r_j + \Delta r_j, r_j + 2\Delta r_j) = T(\Delta r_j). \end{aligned}$$

При выходе за пределы переходного участка для разделенных им слоев:  $(r_i, r_i + \Delta r_i, r_i + 2\Delta r_i)$  – 1-й слой (например, “чистая атмосфера”) и  $(r_j, r_j + \Delta r_j, r_j + 2\Delta r_j)$  – 2-й слой (например, “облако”) становится возможным использовать общее выражение для коэффициента коррекции (16), в котором необходимо учитывать значение прозрачности переходного участка  $T^2(r_i + 2\Delta r_i, r_j)$ . Таким образом, задача коррекции СОР при зондировании слоисто-неоднородных сред с размытыми границами раздела сред усложняется:

- во-первых, необходимостью учета прозрачности протяженного участка рассеивающей среды с изменяющимся значением индикатриссы рассеяния в нем;
- во-вторых, необходимостью выделения участков сред с установившимися значениями оптических и микрофизических характеристик (т.е. границ переходного слоя).

Решение первой задачи сводится к алгоритму (16). Подставив в (16) значение прозрачности, полученное в соответствии с (21), запишем выражение для коэффициента коррекции с учетом ослабления СОР на переходном участке:

$$q_{ij} = \frac{\overline{g_{\pi j}}}{\overline{g_{\pi i}}} = \left[ \frac{I_8}{I_7} \right]^2 \frac{I_6 - I_7}{I_8 - I_9} \frac{I_3(I_5 - I_2)}{I_2(I_5 - I_3)}. \quad (22)$$

**Восстановление оптических характеристик в переходном слое.** Выше получено выражение для коэффициента коррекции (22), позволяющее производить коррекцию СОР для удаленных друг от друга слоев, разделенных переходным участком. Однако решение задачи интерпретации данных лидарных измерений в переходных между слоями участках рассеивающих сред остается открытым, поскольку

- известные методы интерпретации данных лидарного зондирования относительно оптических характеристик требуют выполнения достаточно жестких модельных ограничений, заведомо невыполнимых в переходных участках между слоями;
- рассмотренная выше коррекция, основанная на использовании коэффициента коррекции, которая позволяет «изменять» уровень СОР при модельном предположении  $g_{\pi}(r) = \text{const}$ , также требует выполнения условий (14) и не может быть использована непосредственно внутри переходного слоя.

Поэтому проблему переходного слоя предлагается решать следующим образом [12–15] (рассмотрим пример среды атмосфера – переходной слой – облако): на основе анализа профиля СОР устанавливаются границы переходного слоя; далее, зная эхо-сигналы (скорректированные друг относительно друга при предположении  $g_{\pi}(r) = \text{const}$  по (22)) в слоях “атмосфера” и “облако”, производят интерполяцию сигналов в переходном слое в виде  $S^*(r_k) = S(r_k)q_{ij}(r_k)$  с учетом необходимости выполнения следующих граничных условий:

$$S(r_k)|_{r_k=r_i+2\Delta r_i} = S(r_i + 2\Delta r_i) \quad \text{и} \quad S(r_k)|_{r_k=r_j} = S(r_j)q_{ij},$$

где  $r_k$  – произвольная точка переходного слоя,  $(r_i + 2\Delta r_i)$ ,  $r_j$  – границы слоев “атмосфера” и “облако” с установившимися значениями, а  $S(r_k)$ ,  $S(r_i + 2\Delta r_i)$ ,  $S(r_j)$  – соответствующие им сигналы;  $q_{ij}$  – значение коэффициента коррекции слоя при переходе от слоя “атмосфера” к слою “облако”,

$$q(r_k)|_{r_k=r_i+2\Delta r_i} \equiv 1 \quad \text{и} \quad q(r_k)|_{r_k=r_j} = q_{ij},$$

где значение  $q_{ij}$  определяется согласно (22).

В рамках известных моделей облачности задача интерполирования может ограничиваться следующими законами интерполяции:

- линейным:  $q_{ij}(r_k) = Ar_k + B$ ,

коэффициенты  $A$  и  $B$  записываются следующим образом:

$$A = \frac{1 - q_{ij}}{(r_i + 2\Delta r_i) - r_j}, \quad B = 1 - A(r_i + 2\Delta r_i);$$

– экспоненциальным:  $q_{ij}(r_k) = B \exp(Ar_k)$ ,

коэффициенты  $A$  и  $B$  записываются следующим образом:

$$A = \frac{\ln[1] - \ln[q_{ij}]}{(r_i + 2\Delta r_i) - r_j}, \quad B = \exp[-A(r_i + 2\Delta r_i)];$$

– интерполяции с использованием полиномов Лагранжа (целесообразно проводить при наличии достаточно большого количества отсчетов СОР в переходном слое):

$$S(r_k) = \sum_{l=1}^n S(r_l) \frac{\prod_{m \neq l} (r_k - r_m)}{\prod_{m \neq l} (r_l - r_m)},$$

$n$  – количество отсчетов СОР в переходном слое,  $S(r_l)|_{l=1,2,\dots,n}$  – соответствующие величины СОР,  $m$  – индекс.

Очевидно, что в каждом случае закон интерполяции определяется конкретной метеорологической ситуацией. Далее, используя традиционные методы определения коэффициента ослабления, производим восстановление профиля  $\varepsilon(r)$  из скорректированных на  $q_{ij}$  (с учетом ослабления переходного слоя) и интерполированных в переходном слое СОР.

Требование знания  $q_{ij}$  не усложняет предлагаемый метод, так как при его установлении оперируют только измеряемыми СОР. При этом, как показывает численное моделирование, корректировка на  $q_{ij}$  и дальнейшая интерполяция позволяет значительно улучшить точность восстановления  $\varepsilon(r)$  по всей трассе зондирования “атмосфера – облако”, включая переходный между ними слой.

Для проверки эффективности предлагаемой методики лазерно-локационных измерений в переходном слое проводилось ее численное моделирование, включающее коррекцию СОР (22) (с учетом прозрачности переходного слоя (21)) и интерполяцию лидарных сигналов в переходном слое [14–15].

Рис. 6 относится к случаю наличия на трассе плавного перехода (по линейному закону) в оптических характеристиках и наложению на СОР случайной ошибки в пределах 3%. Кривая 1 на рис. 6 – заданный профиль  $g_{\pi}(r)$ , а кривая 2 – заданный профиль  $\varepsilon(r)$ . Восстановление коэффициента ослабления  $\varepsilon(r)$  (кривая 3) вдоль заданной трассы проводилось методом последовательных слоев без предлагаемой коррекции. Смещение заданного и восстановленного профилей  $\varepsilon(r)$  в области переходного слоя и после него достигает 200% и обуславливается несоответствием поведения профиля  $g_{\pi}(r)$  модельным допущения метода ( $g_{\pi i} = g_{\pi j}$ ).

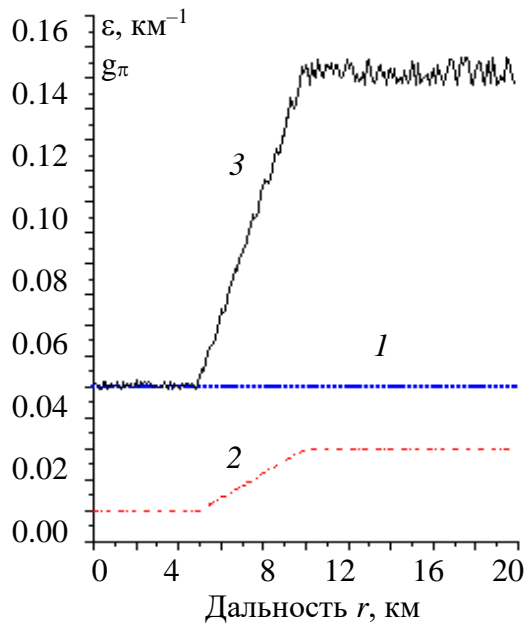


Рис. 6. Результаты восстановления коэффициента ослабления  $\varepsilon(r)$  (кривая 3) методом последовательных слоев без коррекции. Кривая 1 – заданный профиль  $g_{\pi}(r)$ ; кривая 2 – заданный профиль  $\varepsilon(r)$

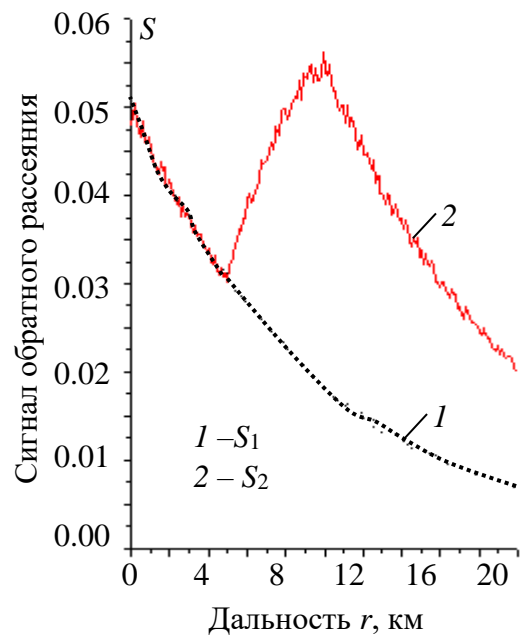


Рис. 7. Профили COP. Кривая 1 – рассчитанный COP, восстановленный на квадрат расстояния; кривая 2 – тот же сигнал, но с коррекцией на  $g_{\pi}$  на участке трассы 5–10 км

Указанный недостаток в значительной мере исключен в предлагаемой методике (рис. 7, 8). Рис. 7 демонстрирует непосредственные результаты коррекции COP, а на рис. 8 изображены результаты интерпретации оптических характеристик (коэффициента ослабления  $\varepsilon(r)$ ) с использованием скорректированного по предлагаемой методике COP. Восстановление профиля  $\varepsilon(r)$  проводилось в следующей алгоритмической последовательности: выделение границ переходного слоя; расчет коэффициента коррекции  $q_{ij}$  по (22); коррекция COP одного слоя относительно другого; интерполяция лидарных сигналов в переходном слое с учетом линейной связи между сигналами в начале и конце переходного слоя.

Рис. 9 относится к случаю наложения на значение  $T(r_i, r_j)$ , определяемого согласно (21), погрешности, равной 10%. Очевидна хорошая устойчивость алгоритма к наличию погрешностей в определении значения прозрачности переходного слоя (погрешность в определении профиля  $\varepsilon(r)$  не превышает 17 %). Естественно, что при меньших погрешностях определения  $T(r_i, r_j)$  погрешность восстановления профилей определяемой оптической характеристики также уменьшится.

Очевидна практическая значимость предлагаемой методики. Ее использование позволяет с высокой точностью восстанавливать профили

$\varepsilon(r)$  на всех участках сред с границами раздела (на атмосферном и на гидросферном при зондировании с борта носителя; в разных слоях облачности; при зондировании выбросов из труб промышленных предприятий и т. п.). Более того, использование в данной методике способов определения опорных (калибровочных) значений оптических характеристик из самих измеряемых СОР позволяет исключать независимые дополнительные измерения, что, в свою очередь, дает возможность автоматизировать эксперимент и оперативно получать результаты в реальном времени. При этом немаловажно и то, что по предлагаемой методике определяется и величина изменения качественного состава рассеивающих сред.

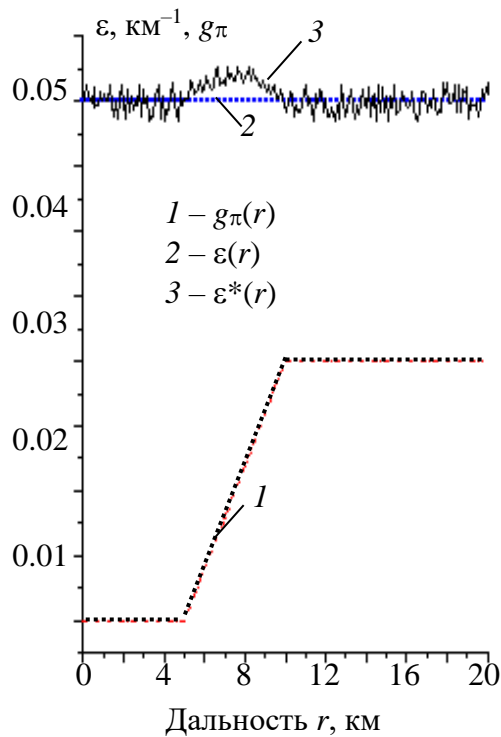


Рис. 8. Результаты восстановления коэффициента ослабления  $\varepsilon^*(r)$  (кривая 3) с использованием скорректированного по предлагаемой методике СОР

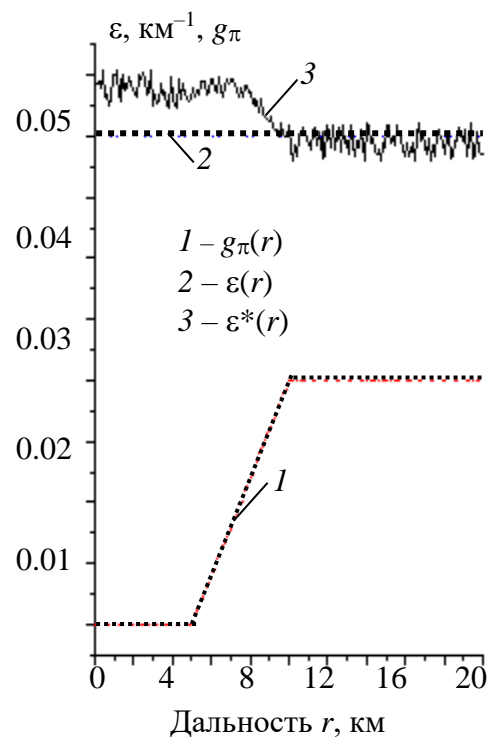


Рис. 9. Результаты восстановления коэффициента ослабления  $\varepsilon^*(r)$  (кривая 3) при наложении на значение прозрачности переходного слоя 10 %-й погрешности

## Литература

1. *Кугейко М. М.* Теория и методы оптико-физической диагностики неоднородных рассеивающих сред в условиях отсутствия априорной информации: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Мн., 1994. 316 с.
2. *Кугейко М. М.* Лазерные системы (в условиях априорной неопределенности). Мн.: БГУ, 1999. 196 с.
3. *Кугейко М. М., Малевич И. А.* Определение из космоса оптических толщин слоев атмосферы и гидросферы // Исследования Земли из космоса. 1991. № 1. С.47 – 53.
4. *Кугейко М. М., Малевич И. А., Оношко Д. М.* Дистанционное определение оптических характеристик многослойных рассеивающих сред //Лазерная и оптоэлектронная техника: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 3. Мн.: БГУ, 1995. С. 186–192.
5. *Кугейко М. М., Оношко Д. М.* Расчет оптических характеристик рассеивающих сред в условиях отсутствия их опорных значений // Лазерная и оптоэлектронная техника: Межвуз. сб. науч. тр., Вып. 3. Мн.: БГУ, 1995. С. 193–208.
6. *Кугейко М. М., Малевич И. А., Оношко Д. М.* Разработка теории диагностики слоисто–неоднородных сред (в условиях минимума априорной и дополнительной измерительной информации) // Новые информационные технологии: Сб. науч. тр. Мн.: БГУ, 1997. С. 91–123.
7. *Кугейко М. М., Малевич И. А., Оношко Д. М.* Определение из космоса оптических характеристик многослойной облачности // Исследования Земли из космоса. 1995. № 6. С. 91–97.
8. *Kugeiko M., Onoshko D.* Remote sensing of atmosphere and water media under conditions of a priori uncertainty. // Proc. SPIE. 1997. Vol. 3110. P. 180–184.
9. *Kugeiko M., Onoshko D.* Laser monitoring of the environment in conditions of a priori uncertainty. // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4535. P. 45–54.
10. *Kugeiko M., Firago V., Barkova A.* Laser diagnostics of aerosol and gas emissions from factory chimneys (concept of elimination of a priori data) // Proc. SPIE. 2001. Vol. 4680. P. 112–121.
11. *Кольчевский Н. Н., Кугейко М. М.* Определение пространственного разрешения при лазерном зондировании атмосферы и водных сред // Тр. III Конф. по лазерной физике и спектроскопии. Гродно, 1997. Т. 1. С. 310–313.
12. *Кугейко М. М., Малевич И. А., Шиперко Э. Д.* Метод интерпретации лидарных сигналов при одночастотном зондировании сложных слоисто–неоднородных сред //Лазерная и оптоэлектронная техника: Межвуз. сб. науч. тр. Мн.: Университетское, 1992. С. 103–110.
13. *Кугейко М. М., Оношко Д. М.* Лазерный метод определения оптических характеристик в переходных слоях «атмосфера–облако» // Тр. III Конф. по лазерной физике и спектроскопии. Гродно, 1997. Т.1. С.343–346.
14. *Кугейко М. М., Оношко Д. М.* Определение из космоса оптических характеристик переходных слоев «атмосфера–облако» //Исследования Земли из космоса. 1998. № 5. С. 21–28.
15. *Кугейко М. М., Оношко Д. М.* Диагностика первичных оптических характеристик переходных участков многослойных рассеивающих сред (в рамках концепции «безаприорности») / Оптика и спектроскопия молекулярных и надмолекулярных систем: Сб. науч. тр. Мн.: БГУ, 2000. С. 130–158.