М.М. Кугейко, Д.М. Оношко

РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕИВАЩИХ СРЕД В УСЛОВИЯХ ОТСУТСТВИЯ ИХ ОПОРНЫХ ЗНАЧЕНИЙ

Наличие большого количества методов расчета профилей оптических характеристик рассеивающих сред по результатам дистанционного зондирования обусловлено наличием разнообразных атмосферно-гидросферных ситуаций, многопараметрической зависимостью измеряемого сигнала обратного рассеяния, что приводит к необходимости использования различных допущений или априорной информации об исследуемой среде. Даже в сравнительно несложных рассеивающих средах (квазиоднородных) используются довольно жесткие допущения о среде, и требуется знание опорных значений определяемых оптических параметров.

Наиболее полный обзор алгоритмов обработки сигналов обратного рассеяния относительно оптических характеристик приведен в [1-3]. Различаются алгоритмы видами используемой априорной информации, характером дополнительных экспериментальных данных и последовательностью математических операций, выполняемых с измеренными значениями сигналов. Систематизация известных однолидарных алгоритмов с единой точки зрения (выявление принципиальных особенностей алгоритмов) и исследования их оптимальности проведены в [3]. Если уравнение оптической локации

$$P(r) = A(r)r^{-2}\beta_\pi(r)T^2(0,r_0)T^2(r_0,r) \quad .(1)$$

преобразовать с учетом связи между ε и β_π к виду

$$\varepsilon'(r) - \varepsilon(r)[\ln \Psi(r)]' = 2\,\varepsilon(r), \quad (2)$$

то из (2) можно получить общее решение уравнения, которое определяется следующим образом [3]:

$$\varepsilon(r) = \Psi(r)\,[\,C - 2\int_{r^*}^{r} \Psi(r)dr]^{-1}\,, \quad (3)$$

где $A(r)$ - аппаратурная функция, $T(r_0,r)$ - интегральное пропускание на участке $[r_0,r]$, r_0 - длина теневой зоны, $\Psi(r)=P(r)r^2A^{-1}g_p^{-1}(r)T^2(0,r_0)$ -

экспериментально определяемая функция, $P(r)$ - экспериментально измеряемый сигнал обратного рассеяния из точки r, C - постоянная интегрирования, r^*-произвольная точка из интервала $[r_0,r]$.

В рассматриваемой задаче уравнение (2) описывает функцию в пространстве, поэтому выбор частного решения (определение постоянных интегрирования) из параметрического семейства (3) определяется не заданием начальных условий, а вариантом задания граничных (калибровочных) условий [3]. Кроме того, требуется абсолютная калибровка лидарного сигнала, т. е. абсолютные измерения $\Psi(r)$. Как следует из [3], методы, использующие абсолютную калибровку сигнала, имеют крайне ограниченную область применения ($\tau << 1$) и дают большую погрешность, поэтому предпочтительнее использование относительных измерений $\Psi(r)=\Psi(r)/\Psi(r_k)$, где r_k - произвольная точка нормировки. При этом снимается проблема измерений A, $T(0,r_0)$ и облегчается прогноз лидарного отношения $g_n(r)$, поскольку здесь уже требуется знание лишь относительного хода $g_n(r)/g_n(r_k)$.

Существующие способы обработки с использованием относительных измерений (как, например, метод логарифмической производной, наклонных трасс) отличаются лишь способом введения априорной информации и характером преобразования экспериментальных данных [3]. При таком разделении выбор того или иного алгоритма определяется характером имеющейся априорной информации. В случае локальной калибровки используются оценки опорного значения $\varepsilon(r_k)$, в случае интегральной калибровки - оценки базового значения $T(r_0,r_k)$. Возможны их комбинации. Все это позволяет реализовать на практике любую из используемых схем обработки регистрируемых оптических сигналов.

Из анализа помехоустойчивости различных схем обработки сигналов обратного рассеяния следует, что устойчивость решения оказывается тем выше, чем больше вносится априорной информации об удаленных участках трассы зондирования [3]. Такая же идеология следует и из работ [4-5], что предполагает использование оценок $\varepsilon(r_k)$ или $T(r_0,r_k)$ на конечных участках исследуемой трассы (их получение возможно независимыми дополнительными измерениями). В условиях же невозможности проведения таких опорных измерений проблема калибровки в конечной точке трассы (и даже в начальной) не решена. Данной ситуации соответствует зондирование по наклонным и вертикальным трассам. Известные способы оценок опорных (калибровочных) значений, не требующие проведения дополнительных независимых измерений, приводят к неоднозначности решения (метод логарифмической производной) [3] или к большой неопределенности [2].

Вариант решения проблемы опорных точек при расчете оптических характеристик рассеивающих сред предложен в [6]. Методика определения прозрачности протяженного участка (интегральная калибровка), используемой в качестве опорного значения, основана на измерении накопленных сигналов обратного рассеяния, восстановленных на квадрат расстояния, для перекрывающихся хотя бы на ширину измерительного канала интервалов. Данная методика может использоваться в ограниченных атмосферно-гидросферных ситуациях. В большинстве же случаев более важно знать локальное опорное значение коэффициента ослабления (решение проблемы локальной калибровки), а также получать калибровочные значения определяемых характеристик на конечных участках трасс зондирования (методика [6] этого не позволяет).

Ниже приводятся алгоритмы получения калибровочных значений $\varepsilon(r_k)$ и $T(r_0,r_k)$ с использованием информации, содержащейся в самих сигналах обратного рассеяния, в рамках предположений, требуемых для обеспечения работоспособности известных способов интерпретации измеряемых сигналов относительно профилей оптических характеристик для всевозможных атмосферных и гидросферных ситуаций и на различных участках трасс, в том числе конечных. Рассматривается эффективность использования получаемых по предлагаемым алгоритмам оценок калибровочных значений для различных схем (методов) обработки сигналов. Предлагаемая теория определения опорных (калибровочных) значений оптических характеристик исключает независимые дополнительные измерения.

Будем исходить из уравнения оптической локации в приближении однократного рассеяния (полагая при этом, что доля поглощения в ослаблении пренебрежима мала) [2]:

$$I(z_i,z_j)=\int_{z_i}^{z_j} P(z)z^2dz = 0.5AP_0g_\pi(z_i,z_j)T^2(0,z_i)(1-\exp(-2\int_{z_i}^{z_j}\varepsilon(z)dz)). \qquad (4)$$

Рассмотрим произвольный участок трассы зондирования $[r_1,r_4]$ (рис.1а). Запишем выражения для сигналов обратного рассеяния $I_1 \div I_5$, соответствующие накоплению их на участках $[r_1,r_2]$, $[r_1,r_3]$, $[r_2,r_4]$, $[r_3,r_4]$ и $[r_2,r_3]$, т. е. :

$$I_1 = \int_{r_1}^{r_2} P(z)z^2dz; \qquad I_2 = \int_{r_1}^{r_3} P(z)z^2dz; \qquad I_3 = \int_{r_2}^{r_4} P(z)z^2dz;$$

$$I_4 = \int_{r_3}^{r_4} P(z)z^2dz; \quad I_5 = \int_{r_2}^{r_3} P(z)z^2dz;$$

$$\begin{aligned}
I_1 &= 0.5AP_0g_x(r_1,r_2)T^2(0,r_1)[1-T^2(r_1,r_2)],\\
I_2 &= 0.5AP_0g_p(r_1,r_3)T^2(0,r_1)[1-T^2(r_1,r_2)T^2(r_2,r_3)],\\
I_3 &= 0.5AP_0g_p(r_2,r_4)T^2(0,r_1)T^2(r_1,r_2)[1-T^2(r_2,r_3)T^2(r_3,r_4)],\\
I_4 &= 0.5AP_0g_p(r_3,r_4)T^2(0,r_1)T^2(r_1,r_2)\,T^2(r_2,r_3)[1-T^2(r_3,r_4)],\\
I_5 &= 0.5AP_0g_x(r_2,r_3)T^2(0,r_1)\,T^2(r_1,r_2)[1-T^2(r_2,r_3)],
\end{aligned} \qquad (5)$$

где $T^2(r_i,r_j) = \exp(-2\int_{r_i}^{r_j} \varepsilon(z)dz)$.

Обозначив $T^2(r_1,r_2) = a_1$, $T^2(r_2,r_3) = a_2$, $T^2(r_3,r_4) = a_3$, $T^2(0,r_1) = a_0$, $0.5AP_0 = B$, $g_\tau(r_1,r_2) = x_1$, $g_x(r_1,r_3) = x_2$, $g_x(r_2,r_4) = x_3$, $g_x(r_3,r_4) = x_4$, $g_\tau(r_2,r_3) = x_5$, запишем (5) в виде:

$$\begin{aligned}
I_1 &= Bx_1a_0(1 - a_1),\\
I_2 &= Bx_2a_0(1 - a_1a_2),\\
I_3 &= Bx_3a_0a_1(1 - a_2a_3),\\
I_4 &= Bx_4a_0a_1a_2(1 - a_3),\\
I_5 &= Bx_5a_0a_1(1 - a_2).
\end{aligned} \qquad (6)$$

Как видно из (6), решение системы уравнений I_i ($i = 1,...,5$) относительно a_i($i = 0,...,3$) не существует уже исходя из того, что число неизвестных a_i, x_i превышает число используемых уравнений. Получим сейчас решения системы (6) при использовании некоторых допущений о среде по трассе зондирования. Можно выделить три следующих варианта (модели среды).

1. Предположим, что $a_1 \approx a_3$. В этом случае

$$\begin{aligned}
I_2 &= Bx_2a_0(1 - a_1a_2),\\
I_3 &= Bx_3a_0a_1(1 - a_2a_3).
\end{aligned} \qquad (7)$$

Решение системы (7) относительно a_1 имеет вид:

$$a_1 = I_3x_3/I_2x_2\,. \qquad (8)$$

Используемое допущение $a_1 \approx a_3$ означает примерное равенство прозрачностей участков $[r_1,r_2]$, $[r_3,r_4]$ (рис.1б). Для малых (непротяженных) участков ($[r_i,r_j] \to 0$) 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 a_1 равно:

$$T^2(r_1,r_2) = a_1 = I_3/I_2, \qquad (9)$$

или

$$\varepsilon(\Delta r) = -1/2\ \mathrm{Ln}(I_3/I_2),$$

т.к. отношение $x_3/x_2 \approx 1$, т. е. для протяженных перекрывающихся участков трассы зондирования $[r_1,r_3]$, $[r_2,r_4]$, отличающихся на величину $\Delta r \to 0$, 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 по (9) значение коэффициента ослабления на участке Δr можно использовать в качестве опорного (калибровочного) для методик расчета оптических характеристик, требующих знания локальных опорных значений (при $\Delta r \to 0$). 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 (9) для определения прозрачности a_1 протяженного участка $[r_1,r_2]$ (для $(r_2 - r_1) \to \infty$) предположения $a_1 \approx a_3$, $x_3/x_2 \approx 1$ являются более жесткими (менее выполнимыми), чем для случая $(r_2-r_1) \to 0$. Действительно, равенство прозрачностей для двух разнесенных протяженных участков трассы зондирования может выполняться для значительно меньшего числа атмосферных и гидросферных ситуаций, чем равенство прозрачностей малых участков.

Естественно получение алгоритмов интегральной калибровки (определение прозрачности протяженного участка) при использовании не жестких предположений об a_1 и a_3. Для этого рассмотрим функционалы

$$I_1 = Bx_1a_0(1 - a_1),$$

$$I_2 = B x_2 a_0 (1 - a_1 a_2),$$
$$I_3 = B x_3 a_0 a_1 (1 - a_2 a_3), \qquad (10)$$
$$I_4 = B x_4 a_0 a_1 a_2 (1 - a_3).$$

Из (10) легко получить выражение для a_2 :

$$a_2 = \frac{x_1\ x_3}{x_2\ x_4}\ \frac{I_2\ I_4}{I_1\ I_3}\ . \qquad (11)$$

Полученное выражение (11) наиболее удовлетворяет ситуации, изображенной на рис. 2.1в. При $(r_2-r_1) \to 0$, $(r_4-r_3) \to 0$, $T(r_1,r_2)$, $T(r_3,r_4)$ 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 $(x_1x_3)/(x_2x_4)$ во всех случаях, соответствующих случайному процессу с некоррелированными значениями ε, g_π по трассе. Действительно, в этом случае

$$x_1x_3 = g_\pi(r_1,r_2)\ g_\pi(r_3,r_4) = g_\pi(r_1,r_2) g_\pi(r_2,r_3)\ g_\pi(r_3,r_4),$$
$$x_2x_4 = g_\pi(r_1,r_3)\ g_\pi(r_3,r_4) = g_\pi(r_1,r_2) g_\pi(r_2,r_3)\ g_\pi(r_3,r_4).$$

Таким образом, если лидарные отношения по исследуемой квазистационарной трассе являются независимыми или слабокоррелированными величинами (а это соответствует множеству атмосферных и гидросферных трасс), то $(x_1x_3)/(x_2x_4) \approx 1$. С учетом этого (11) имеет вид:

$$T^2(r_2,r_3) = \frac{I_2\ I_4}{I_1\ I_3}\ . \qquad (12)$$

Получаемые по (12) значения прозрачности можно использовать в качестве опорных (калибровочных) для известных методик, требующих знания интегральных опорных значений прозрачностей протяженных участков трассы (вариант решения проблемы интегральной калибровки). Используемые при этом допущения в значительной степени менее жесткие, чем для варианта локальной калибровки (9), т.к. не требуют предположений или допущений о поведении лидарного отношения по трассе.

Варианты решения проблемы калибровки возможны и при использовании функционалов I_1, I_4, I_5. Действительно, при $a_1 \approx a_3$ (см. рис. 2.1е):

$$
\begin{aligned}
I_1 &= Bx_1a_0(1 - a_1),\\
I_4 &= Bx_4a_0a_1a_2(1 - a_3),\\
I_5 &= Bx_5a_0a_1(1 - a_2).
\end{aligned}
\tag{13}
$$

Из (13) следует, что

$$
a_1a_2 = \frac{x_1}{x_4}\,\frac{I_4}{I_1}\,. \tag{14}
$$

С другой стороны:

$$
I_4 = Bx_4\,\frac{I_5}{Bx_5(1-a_2)}\,a_2(1-a_1) = \frac{x_4I_5}{x_5(1-a_2)}\left[a_2 - \frac{x_1I_4}{x_4I_1}\right]. \tag{15}
$$

Решая (15) относительно a_2, получаем:

$$
a_2 = \frac{x_1I_5I_4/I_1 + x_5I_4}{x_4I_5 + x_5I_4}\,. \tag{16}
$$

Так как $a_1 = T^2(r_1,r_2)$, $a_2 = T^2(r_2,r_3)$, то $a_1a_2 = T^2(r_1,r_3)$ и (14), (16) принимают вид:

$$
T^2(r_1,r_3) = \frac{g_x\,(r_1,r_2)\quad I_4}{g_x\,(r_3,r_4)\quad I_1}, \tag{17}
$$

$$
T^2(r_2,r_3) = \frac{g_x\,(r_1,r_2)\ \ I_5I_4/I_1 + g_x\,(r_2,r_3)\,I_4}{g_x\,(r_3,r_4)\,I_5 + g_x\,(r_2,r_3)\,I_4}\,. \tag{18}
$$

С другой стороны,

$$
T(r_1,r_2) = T(r_1,r_3)\,/\,T(r_2,r_3). \tag{19}
$$

При $(r_2 - r_1) \to 0$ выражение (19) можно записать следующим образом:

$$\varepsilon(\Delta r) = \frac{1}{2(r_2 - r_1)} \, \mathrm{Ln}\,[\,T(r_1,r_3) \,/\, T(r_2,r_3)\,]. \qquad (20)$$

где $T(r_1,r_3)$, $T(r_2,r_3)$ берутся соответственно из (17) и (18).

Таким образом, значения $\varepsilon(\Delta r)$, получаемые по алгоритму (20), можно использовать в качестве опорных (калибровочных) для методик с локальной калибровкой, а значения прозрачности, получаемые по алгоритмам (17), (18),-для методик с интегральной калибровкой. Однако по сравнению с рассмотренными выше алгоритмами здесь используются более жесткие допущения, требующие равенства средних значений $g_л(r)$ на разнесенных участках трассы зондирования или их знание. В то же время многие известные методики определения оптических характеристик используют предположение о постоянстве лидарного отношения по исследуемой трассе. Очевидно, что в рамках этого предположения выражения (17) и (18) преобразуются к виду:

$$T^2(r_1,r_3) = I_4 / I_1 , \qquad (21)$$

$$T^2(r_2,r_3) = \frac{I_5 I_4/I_1 + I_4}{I_5 + I_4} . \qquad (22)$$

Следует подчеркнуть, что в этом случае для установления опорных (калибровочных) значений привлечения более широких допущений (по сравнению с допущениями, при которых работают известные методики определения профилей оптических характеристик) не требуется.

2. Рассмотренные выше алгоритмы получения опорных (калибровочных) значений из самих сигналов обратного рассеяния, информативных относительно профилей оптических характеристик, установлены в предположении $a_1 \approx a_3$. Однако решение системы уравнений из функционалов I_i возможно и с использованием предположения $a_2 \approx a_3$. Схема расположения функционалов I_i, соответствующая данному варианту, изображена на рис. 2.1д. В этом случае участки a_2 и a_3 должны располагаться в конце протяженного участка и быть малыми, т.е. $(r_2 - r_1) \to 0$, $(r_4 - r_3) \to 0$. 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 [6]:

$$a_1 = T^2(r_1,r_2) = \frac{m\, I_2 - I_1}{m\, I_2 - n\, I_1 I_4 / I_5}, \qquad (23)$$

где $m = g_x(r_1,r_2) / g_x(r_1,r_3)$, $n = g_x(r_2,r_3) / g_x(r_3,r_4)$.

Для протяженных участков рассеивающих сред $[r_1,r_2]$, $[r_1,r_3]$ 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 лидарных отношений для двух соседних участков трассы. Однако в рамках используемых известными методами предположений о том, что $g_x(r) = \mathrm{const}$ 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:

$$T^2(r_1,r_2) = \frac{I_2 - I_1}{I_2 - I_1 I_4 / I_5} \qquad (24)$$

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

В случае неоднородных рассеивающих сред (с большим разбросом $g_x(r)$) применение алгоритма (24) определяется наличием участков, удовлетворяющих условию [7]:

$$\delta\beta_x < \exp\{2\varepsilon\Delta r\} - 1, \qquad (25)$$

следующему из необходимости получения корректного результата (прозрачность не должна быть больше 1 или меньше 0), где $\delta\beta_x = \Delta\beta_x/\beta_x$ - степень неоднородности среды.

В [6] получено следующее выражение для коэффициента ослабления на участке $\Delta r_k = [r_0, r_0 + \Delta r]$:

$$\varepsilon(\Delta r_k) = -\frac{1}{2\,\Delta r_k}\,\mathrm{Ln}\left[\,1 - I(\Delta r_k)\,\frac{I_5 - I_4}{I_2 I_5 - I_1 I_4}\,\right], \qquad (26)$$

которое можно использовать в качестве опорных (калибровочных) в любом из известных методов с локальной калибровкой. Длина участка Δr_k может быть произвольной, она не связана с длиной участков определения функционалов I_i.

Если на исследуемой трассе находятся два соседних участка [r, r+Δr], [r+Δr, r+ 2Δr], на которых $\varepsilon(r, r + \Delta r) \approx \varepsilon(r + \Delta r, r + 2\Delta r)$, $g_n(r, r + \Delta r) \approx g_n(r + \Delta r, r + 2\Delta r)$, то функционалы

$$I_1 = \int_r^{r+\Delta r} P(z)z^2dz, \qquad I_2 = \int_{r+\Delta r}^{r+2\Delta r} P(z)z^2dz$$

можно рассматривать как члены бесконечно убывающей прогрессии. Исходя из этого, I_∞ (r,∞) вычисляется как сумма членов геометрической прогрессии:

$$I_\infty(r,\infty) = \frac{I_1}{1 - q} = \frac{I_1}{1 - I_2 / I_1}.$$

С учетом этого

$$\varepsilon(\Delta r_k) = -\frac{1}{2\,\Delta r_k}\,\mathrm{Ln}\left[\,1 - \frac{I(\Delta r_k)}{I_1}(1 - q)\,\right]. \qquad (27)$$

Выражение (27) также можно использовать для получения опорного (калибровочного) значения для любого из методов с локальной калибровкой. Однако используемое при этом предположение требует наличия на трассе либо квазиоднородных участков, что возможно в ограниченных случаях, либо определения функционалов I_1 и I_2 на протяженных участках, что более предпочтительнее при зондировании фонового аэрозоля.

3. Рассмотренный в пункте 2 алгоритм (25) позволяет определять прозрачность протяженных участков трасс зондирования, расположенных на начальных участках. Аналогичный результат для прозрачности участков, расположенных на конечных участках исследуемых трасс, что соответствует более устойчивому решению задачи восстановления профилей оптических характеристик, можно получить, если предположить, что $a_1 \approx a_2$. Этому предположению наиболее соответствует расположение функционалов, изображенное на рис. 2.1е. Участки $[r_1,r_2]$, $[r_2,r_3]$, соответствующие функционалам I_1, I_5, должны быть при этом малыми ($[r_1,r_2] \to 0$, $[r_2,r_3] \to 0$). Решается система уравнений:

$$
\begin{aligned}
I_1 &= Bx_1a_0(1 - a_1),\\
I_3 &= Bx_3a_0a_1(1 - a_1a_3),\\
I_4 &= Bx_4a_0a_1^2(1 - a_3),\\
I_5 &= Bx_5a_0a_1(1 - a_1)
\end{aligned}
\qquad (28)
$$

относительно a_1, a_3. Из первого и последнего уравнений системы следует, что

$$
a_1 = \frac{x_1}{x_5}\,\frac{I_5}{I_1}. \qquad (29)
$$

Подставляя a_1 в

$$
\frac{I_3}{I_4} = \frac{x_3}{x_4}\,\frac{1}{a_1}\,\frac{(1 - a_1a_3)}{(1 - a_3)},
$$

получаем, что

$$
a_3 = T^2(r_3,r_4) = \frac{I_4x_3 - I_3I_5x_4\, x_1/x_5I_1}{(I_4x_3 - I_3x_4)\,(x_1I_5/x_5I_1)}. \qquad (30)
$$

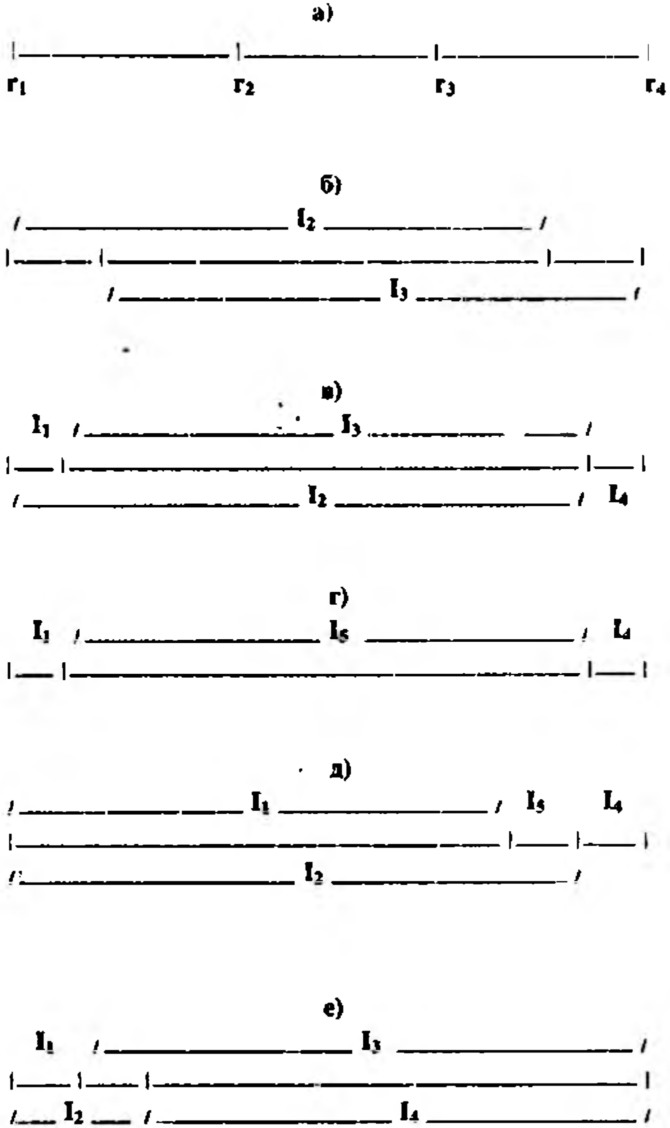

Рис. 2.1. Схема расположения участков накопления сигналов обратного рассеяния для различных моделей рассеивающих сред при определении локальных и интегральных опорных значений оптических характеристик

В рамках используемого известными методами предположения о том, что $g_x(r)$=const или медленно изменяющаяся от точки к точке функция, выражение (30) преобразуется к виду:

$$T^2(r_3,r_4) = \frac{I_4 - I_3 I_5 / I_1}{(I_4 - I_3)(I_5 / I_1)} . \tag{31}$$

Выражение (31), таким образом, также можно использовать для осуществления интегральной калибровки в методах восстановления оптических характеристик, использующих допущение о постоянстве лидарного отношения по исследуемой трассе. В тоже время, так как на полученное только что выражение не влияют границы раздела сред на $[r_3,r_4]$, то (31) можно эффективно применять при определении прозрачности и по глиссаде.

Все полученные выше алгоритмы (в вариантах 1 - 3) как для локальной, так и интегральной калибровок не содержат ни аппаратурных констант, ни зависимости от энергии зондирующих импульсов. Из этого следует устойчивость алгоритмов к разбросу энергии зондирующих импульсов от одной посылки к другой, отсутствие абсолютной калибровки системы, исключаются погрешности определения аппаратурных констант. Более того, работоспособность алгоритмов получения опорных (калибровочных) значений по вариантам 2 - 3 не нарушается и при наличии резкого перепада в значениях оптических характеристик на границах раздела сред. Действительно, для протяженных участков, включающих границы раздела и отличающихся на небольшую величину пространственного разрешения Δr, средние значения

$$g_x(r_0,r) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} g_x(\Delta r_i), \qquad g_x(r_0,r+\Delta r) = \frac{1}{N+1}\sum_{i=1}^{N+1} g_x(\Delta r_i)$$

при больших N ($N = (r - r_0)/\Delta r$, $\Delta r \to 0$) практически равны и $m \approx 1$, что и приводит к независимости алгоритмов калибровки от границам раздела (резкого перепада в значениях оптических характеристик) сред. Алгоритмы по варианту 1 требуют использования предположения $a_1 \approx a_3$, которое может выполняться только при отсутствии резкого изменения характера среды, т.е. для сред без резких границ раздела по оптической плотности.

В то же время все полученные выше алгоритмы интегральной калибровки по вариантам 1-3, а также алгоритм локальной калибровки по (8), устойчивы к наличию слоев с резко выделенным изменением оптических характеристик (например, выбросов труб промышленных предприятий при зондировании городского аэрозоля, облачного слоя, при зондировании атмосферы с самолета и т.п.) на участках определения прозрачности (для (12) в любом месте интервала $[r_1,r_4]$). Это следует также из того, что данные слои одновременно включаются в функционалы I_i для протяженных участков, отличающихся на величину пространственного разрешения, обычно небольшую ($\Delta r \to 0$), и средние значения $g_x(r_i,r_j)$, $g_x(r_i,r_j+\Delta r)$ этих участков практически равны.

Измеряемые функционалы I_i во всех изложенных в пунктах 1 - 3 алгоритмах интегральной и локальной калибровок используются в виде отношения соседних, отличающихся на величину Δr, отсчетов. Вклады многократного рассеяния C_i для соседних отсчетов, отличающихся на величину $\Delta r \to 0$, практически одинаковы. Таким образом, алгоритмы вида (8) и (23) можно записать:

$$a_1 = \frac{C_3}{C_2}\,\frac{I_3}{I_2},$$

$$a_1 = \frac{mC_1I_2 - C_1 I_1}{mC_1I_2 - n\, C_1C_3I_1I_4 / C_3I_3},$$

т. к. $C_3 \approx C_2$ для (8), и $C_1 \approx C_2$, $C_3 \approx C_4$ для (23).

Независимость алгоритмов калибровки от C_i ($i=1,...4$), характеризующих вклад многократного рассеяния, и приводит к незначительному влиянию многократного рассеяния на результаты определения калибровочных значений T, ε. Незначительное влияние вклада многократного рассеяния в измеряемые сигналы в алгоритмах расчета оптических характеристик, использующих сигналы в виде относительного хода соседних, отличающихся на Δr, отсчетов отмечалось ранее в [3,8].

Предлагаемые алгоритмы определения интегральных и локальных калибровочных значений используют информацию, которая содержится в самих сигналах обратного рассеяния, и не требуют 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, алгоритмы вариантов 2 - 3 требуют гладкости $g_\pi(r)$ и равенства средних значений $\varepsilon(r)$ на произвольных (малых или больших) участках среды. Это требование менее жесткое по сравнению с требованиями однородности среды или равенства $g_\pi(r)$ и ε в достаточно тонких соседних слоях (при этом необходимо знание начального значения ε и априорная информация о поведении $g_\pi(r)$ между слоями), присущими так называемым численным методам решения уравнения оптической локации (по классификации [2]). То же можно сказать и о методах, основанных на аналитическом решении [2], требующих неизменности $g_\pi(r)$ по всей трассе или знания функциональной связи между $g_\pi(r)$ и ε. Более того, отсутствие в предлагаемых алгоритмах ограничений на длины участков определения функционалов I_i повышает устойчивость их к влиянию измерительных погрешностей.

Алгоритмы же определения калибровочных значений оптических характеристик по варианту 1 требуют использования вообще минимальных предположений, а именно, примерного равенства прозрачностей участков для двух малых участков (при $\Delta r \to 0$) исследуемой среды. Практически это означает равенство прозрачностей участков, соответствующих стробу (каналу) измерительной аппаратуры, что соблюдается даже при значительных разбросах оптических характеристик ($\exp\{-2\varepsilon\Delta r\} \approx 1$ при $\Delta r \to 0$ и значительном разбросе ε). Так, например, при $\Delta r = 0{,}01$ км и $\varepsilon = 0{,}1$; $0{,}01$ км соответственно $T(\Delta r)$ равны 0.998 и 0.9998. Правда, для данных алгоритмов нежелательно наличие границы раздела сред на $[r_1,r_4]$, т. к. в этом случае начинает сказываться влияние изменения $g_\pi(r)$. Для трасс без границ раздела сред, как показано аналитически в описании варианта 1, влияния разброса $g_\pi(r)$, обусловленного естествеными флуктуациями или за счет турбулентности, практически не существует ($g_\pi(r_1,r_2)g_\pi(r_2,r_4) \approx g_\pi(r_1,r_3)g_\pi(r_3,r_4)$ для одного и того же участка $[r_1,r_4]$). Данные предположения, таким образом, являются наименее жесткими из всех, используемых в известных методах.

Таким образом, как видно из вышеизложенного, практически для любой атмосферной и гидросферной ситуации можно выбрать алгоритм определения опорного (калибровочного) значения оптической характеристики из измеряемого сигнала обратного рассеяния и исключить нежелательные дополнительные независимые измерения калибровочных значений T или ε. При этом используется тот сигнал обратного рассеяния, который измеряется для определения оптических характеристик по исследуемой трассе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование - М.: Мир, 1987. - 550с.

2. Зуев В.Е., Креков Г.М., Крекова М.М. Лазерное зондирование атмосферного аэрозоля (теоретические аспекты) //Дистанционное зондирование атмосферы. - Новосибирск: Наука, 1973. - С. 3-45.

3. Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы - Новосибирск: Наука, 1986. - 186с.

4. Klett I.D. Stable analitical inversion solution for processing lidar returns //Appl. Optics. - 1981, P. 20-211.

5. Klett I.D. Lidar calibration an extinction coefficient // Appl. Optics. - 1983, P.22-P.514.

6. Кутейко М.М., Малевич И.А., Зенченко С.А. К решению проблемы опорных точек при расчете оптических характеристик сложных рассеивающих сред. //Изв. АН СССР. ФАО. - 1990. - Т.26, N2. - С. 213-216.

7. Кугейко М.М., Малевич И.А. Определение из космоса оптических толщин слоев атмосферы и гидросферы //Исследование Земли из космоса. - 1991, N1 - С. 47-53.

8. Кавкянов С.И., Креков Г.М. Помехоустойчивость различных систем обработки сигналов оптического зондирования //Исследование атмосферного аэрозоля методами лазерного зондирования. - Новосибирск: Наука, 1980 - С. 3-17.