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

ДИСТАНЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ РАССЕИВАЮЩИХ СРЕД

Анализ радиационного баланса Земли требует использования уравнения переноса оптического излучения, включающего первичные оптические характеристики, в число которых входит коэффициент ослабления ε. Оперативное измерение ε может быть проведено при использовании наземных и аэрокосмических лидарных систем, так как известные методы, основанные на законе Бугера [1,2], этого не позволяют. Без применения дистанционных наземных и аэрокосмических средств невозможен оперативный охват больших площадей.

Наибольшие трудности при определении оптических характеристик дистанционными локационными методами возникают в случаях зондирования сложных рассеивающих сред (неоднородных, с границами раздела, изменяющимся качественным составом и т.п.). Обусловливается это тем, что используемое в данных методах уравнение оптической локации

$$I(z) = AP_0z^{-2}\beta_\pi(z)\exp(-2\int_0^z \varepsilon(z)dz), \qquad (1)$$

где A - аппаратурная функция, P_0 - энергия зондирующего импульса, $\beta_\pi(z)$ - коэффициент обратного рассеяния в точке z, I(z) - измеряемый сигнал обратного рассеяния из точки z, является много- параметрическим, и корректное его решение относительно $\varepsilon(z)$ требует использования априорной информации или допущений об исследуемой среде [3]. Кроме того, необходимо знание опорных (калибровочных) значений $\varepsilon(z_k)$, получение которых осуществляется независимыми дополнительными измерениями. При отсутствии возможности проведения соответствующих опорных измерений проблема калибровки не решена. Известные способы оценок опорных значений посредством метода логарифмической производной [4] и параметра регуляризации [5] приводят, соответственно, к неоднозначности решения и большой неопределенности.

Вариант решения проблемы интегральной калибровки из самих измеряемых сигналов обратного рассеяния, информативных относительно профилей определяемой оптической характеристики $\varepsilon(z)$, 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. Данные опорные значения могут использоваться при расчете прозрачностей протяженных участков трасс зондирования. Для определения профилей коэффициентов ослабления из лидарных измерений необходимо решение проблемы локальной калибровки (получение опорных значений коэффициентов ослабления $\varepsilon(z_k)$ в локальных точках z_k из измеряемых сигналов обратного рассеяния (без проведения дополнительных независимых измерений)).

Для многослойных сред с изменяющимся от слоя к слою качественным составом рассеяния решение проблемы калибровки усложняется необходимостью установления опорных значений измеряемых параметров внутри каждого слоя.

Исключить необходимость определения опорных значений измеряемых сигналов внутри каждого слоя многослойной рассеивающей среды позволяет приводимая ниже методика. Она основана на получении из регистрируемых сигналов локальных калибровочных значений $\varepsilon(z_k)$ внутри произвольного слоя (без проведения дополнительных измерений) и коррекции регистрируемого сигнала на величину перепада лидарного отношения $g_\pi(z)=\beta_\pi(z)/\varepsilon(z)$ при переходе от одного рассеивающего слоя к другому (на степень изменения качественного состава рассеивающей среды в разных слоях).

Будем исходить из уравнения оптической локации (1) в приближении однократного рассеяния. Для сигналов обратного рассеяния, отраженных от участков $[z_i,z_k]$, можно записать следующие функционалы [4]:

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

где $g_\pi(z_i,z_j)$ - среднее значение индикатрисы рассеяния на $[z_i,z_j]$.

Приближение однократного рассеяния при узкой угловой диаграмме детектора $2\phi d=0.0003$ может быть использовано до значительных оптических толщин ($\tau = 5$) [3].

Рассмотрим произвольный участок трассы зондирования $[z_1,z_4]$. В предложенном в [6] варианте решения проблемы интегральной калибровки для определения прозрачности протяженного участка $[z_1,z_2]$ использовались перекрывающиеся функционалы $I(z_1,z_2)$ и $I(z_1,z_3)$, а также $I(z_2,z_3)$ и $I(z_3,z_4)$. Получаемое при этом выражение для $T(z_1,z_2)$ требует использования предположения о примерном равенстве $g_к(z_2,z_3)$ и $g_к(z_3,z_4)$ и имеет вид:

$$T^2(z_1,z_2) = \frac{I(z_1,z_3) - I(z_1,z_2)}{I(z_1,z_3) - I(z_1,z_2)I(z_3,z_4)/I(z_2,z_3)}. \qquad (3)$$

Данный алгоритм может применяться в методах расчета оптических характеристик (прозрачности), требующих интегральной калибровки. Однако для большинства известных методов определения профилей оптических характеристик (коэффициентов ослабления) требуется знание локального калибровочного значения $\varepsilon(z_k)$. Если для однородных и неоднородных рассеивающих сред с небольшим разбросом $\varepsilon(z)$ по трассе возможен переход от (3) к среднему значению $\varepsilon(z_k)$, то для многослойной облачности это невозможно.

При зондировании из космоса многослойной облачности локальные опорные значения $\varepsilon(z_k)$ предпочтительнее получать на атмосферном участке исследуемой трассы, ввиду наибольшего соответствия среды на этом участке используемым предположениям. Данному варианту соответствуют функционалы, отличающиеся на ширину канала регистрирующей аппаратуры. Для функционалов $I(z_1,z_2)$ и $I(z_1,z_3)$ можно записать следующую систему уравнений:

$$I(z_1,z_2) = B\, x_1 a_0 (1-a_1),$$
$$I(z_2,z_3) = B\, x_2 a_0 a_1 (1-a_2), \qquad (4)$$

где $a_0 = \exp(-2\int_0^{z_0} \varepsilon(z)dz)$; $a_1 = \exp(-2\int_{z_1}^{z_2} \varepsilon(z)dz)$; $a_2 = \exp(-2\int_{z_2}^{z_3} \varepsilon(z)dz)$;

$B = 0.5AP_0$; $x_1 = g_к(z_1,z_2)$; $x_2 = g_к(z_2,z_3)$.

Если предположить, что $a_1 \approx a_2$, то решение системы (4) относительно a_1 имеет вид:

$$a_1 = \frac{g_к(z_1,z_2)}{g_к(z_1,z_3)}\,\frac{I_2}{I_1}. \qquad (5)$$

Используемое допущение $a_1 \approx a_2$ означает примерное равенство прозрачностей участков $[z_1,z_2]$ и $[z_1,z_3]$. Для малых (непротяженных) участков (при $[z_i,z_j] \to 0$ значение $T(z_i,z_j) \to 1$) практически всегда данное условие выполняется. Если же участки $[z_i,z_j]$ будут соответствовать ширине канала регистрации сигнала обратного рассеяния (стробу), обычно малому, то для атмосферы будет выполняться условие $g_\pi(z_1,z_2)=g_\pi(z_1,z_3)$ и (5) в этом случае преобразуется следующим образом:

$$\varepsilon(\Delta z_i) = -\frac{1}{2\Delta z}\,\mathrm{Ln}\left(\frac{I_3}{I_2}\right), \qquad (6)$$

где $\Delta z = z_2 - z_1$.

Таким образом, в условиях невозможности проведения соответствующих калибровочных измерений предлагается использовать только ту информацию, которая содержится в самих сигналах обратного рассеяния, даже без более широкого привлечения разного рода упрощающих предположений, поскольку (6) верно и в рамках широко используемого предположения $g_\pi(z)=const$ или медленно меняющейся от точки к точке функции.

Алгоритмы (5) и (6) не содержат ни аппаратурных констант, ни зависимости от энергии зондирующих импульсов, что обусловливает их устойчивость к разбросу энергии зондирующих импульсов и отсутствие абсолютной калибровки системы. Устойчивы они и к вкладу многократного рассеяния, так как используют отношения соседних, отличающихся на величину Δz, отсчетов (данное утверждение обосновано в [3]). Как показано в [6], алгоритм (5) устойчив и к влиянию границ раздела сред.

Полученные по (5), (6) калибровочные опорные значения можно использовать для восстановления профилей оптических характеристик для того слоя, в котором расположены участки $[z_1,z_4]$ трассы зондирования (в данном примере, на атмосферном участке). При переходе в другой слой (облачный) необходимо новое определение $\varepsilon(z_k)$ и $T(z_i,z_j)$ для данного слоя. Исключить необходимость установления опорных калибровочных значений определяемых характеристик в каждом слое можно на основе коррекции регистрируемого сигнала обратного рассеяния на величину лидарного отношения.

Выражение (1) с учетом связи между β_π и ε можно записать в виде:

$$\Psi(z) = \varepsilon(z)\exp(-2\int_{z_0}^{z}\varepsilon(z)dz), \qquad (7)$$

где $\Psi(z) = I(z)z^2A^{-1}g_\pi^{-1}(z)T^2(0,z_0)$ - (8)

экспериментально определяемая функция.

Сравним экспериментально определяемые функции $\Psi(z)$ для произвольных точек z в слоях i и j:

$$\Psi(z_i) = S(z_i)C_i, \qquad (9)$$
$$\Psi(z_j) = S(z_j)C_j = S(z_j)C_i q_{ij},$$

где $S(z) = I(z)z^2$; $C_i = A^{-1}g_{\pi i}^{-1}T^2(0,z_0)$; $C_j = A^{-1}g_{\pi j}^{-1}T^2(0,z_0)$;

Как видно из (5), при переходе от слоя i к слою j происходит изменение экспериментально определенной функции $\Psi(z)$ за счет изменения лидарного отношения. Величина этого изменения равна $q_{ij}=g_{\pi i}/g_{\pi j}$, так как $C_j=C_iq_{ij}$. Это означает, что при расчете оптических характеристик в слое j необходимо производить корректировку в константе C_i, используемой в слое i, на величину q_{ij}. Физический смысл корректировки заключается в использовании одной константы для всей многослойной трассы зондирования, что позволяет свести алгоритм восстановления профилей $\varepsilon(z)$ к модели с постоянным лидарным отношением по всей исследуемой трассе зондирования. Иными словами, для более корректного использования методик, требующих предположения $g_\pi(z)$=const, в случае многослойных сред необходима подстройка (коррекция) сигнала под используемое предположение. Так как ниже предлагаются способы определения q_{ij} из измеряемых сигналов обратного рассеяния, то требование знания q_{ij} не является усложняющим предлагаемую методику, тем более, что коррекция на q_{ij} позволяет значительно улучшить точность восстановления $\varepsilon(z)$ во всех слоях исследуемой среды.

Для обоснования вышесказанного рассмотрим функционалы I, (при условии g_π=const в слоях):

$$I_1^{*}=I(z_i,z_i+\Delta z_i)=Ag_{\pi i}T^2(0,z_i)[1-T^2(\Delta z_i)],$$
$$I_2^{*}=I(z_i+\Delta z_i,z_i+2\Delta z_i)=Ag_{\pi i}T^2(0,z_i)T^2(\Delta z_i)[1-T^2(\Delta z_i)], \qquad (10)$$
$$I_3^{*}=I(z_j,z_j+\Delta z_j)=Ag_{\pi j}T^2(0,z_i)T^4(\Delta z_i)T^2(z_i+\Delta z_i,z_j)[1-T^2(\Delta z_j)],$$
$$I_4^{*}=I(z_j+\Delta z_j,z_j+2\Delta z_j)=Ag_{\pi j}T^2(0,z_i)T^4(\Delta z_i)T^2(z_i+\Delta z_i,z_j)T^2(\Delta z_j)[1-T^2(\Delta z_j)].$$

Решение системы (10) относительно q_{ij} при $\Delta z_i=\Delta z_j$ имеет вид:

$$q_{ij}=\frac{g_{\pi i}}{g_{\pi j}}=(I_3^*/I_2^*)^2\ \frac{I_1^*-I_2^*}{I_3^*-I_4^*}\ T^2(z_i+\Delta z_i,z_j). \qquad (11)$$

Для соседних слоев $[T^2(z_i+2\Delta z_i,z_j)=T^2(z_i,z_j+2\Delta z_j)\ \to\ 1]$ алгоритм упрощается:

$$q_{i,i+1}=(I_3^*/I_2^*)^2\ \frac{I_1^*-I_2^*}{I_3^*-I_4^*}. \qquad (12)$$

Из (11) следует, что для определения q_{ij} необходимо знание прозрачности участка $[z_i,z_j]$, включающего границы раздела слоев. Как уже отмечалось выше, для таких ситуаций можно использовать алгоритм (5) для определения $T^2(z_i,z_j)$.

Значение коэффициента коррекции q_{ij} можно получить и из следующих соображений. При равенстве прозрачностей двух соседних участков трассы зондирования (для $\Delta z\to 0$, $T(\Delta z)\to 1$) и $g_\pi(z)$=const измеряемые функционалы $I_1^*(z,z+\Delta z)$ и $I_2^*(z+\Delta z,z+2\Delta z)$ можно рассматривать как первые два члена бесконечно убывающей геометрической прогрессии со знаменателем I_2^*/I_1^*. Исходя из этого, асимптотический функционал $I_m(z)$ вычисляется как сумма всех членов прогрессии, т.е.

$$I_m(z_i)=\int_{z_i}^{\infty} I(r)r^2dr=\frac{I_1^{*2}}{I_1^*-I_2^*}. \qquad (13)$$

С другой стороны, $I_m(z_i)=AP_0g_\pi(0,z_i)T^2(0,z_i)$.

Аналогичные выражения можно записать для $I_m(z_j)$:

$$I_m(z_j)=\int_{z_j}^{\infty} I(r)r^2dr=\frac{I_3^{*2}}{I_3^*-I_4^*},$$

$$I_m(z_j)=AP_0g_\pi(0,z_j)T^2(0,z_j). \qquad (14)$$

С учетом (13), (14) выражения (11), (12) преобразуются к следующему виду:

$$q_{ij} = [I_m(z_j)/ I_m(z_i)] T^2(z_i+\Delta z_i,z_j), \quad (15)$$
$$q_{i,i+1}=I_m(z_{i+1})/I_m(z_i).$$

Так как мы рассматриваем зондирование плотных рассеивающих сред (облачности), то в практическом плане использование (15) сводится к накоплению сигналов обратного рассеяния с участков, оптическая толщина которых $\tau\approx3$. Если в атмосфере измерить сигналы, соответствующие $\tau<3$ невозможно (τ всего слоя безоблачной атмосферы меньше 3), то в облачности это осуществляется на десятках - сотнях метров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методы пассивного зондирования в задачах определения вертикальной прозрачности атмосферы /А.Н. Волков, С.В. Зоркальцев, Д.М. Кабанов, С.М. Сакерин //Оптические свойства земной атмосферы.- Томск: 1988. - С. 121 - 131.

2. Оптическая толщина аэрозоля атмосферы над морем/К.С. Шифрин, В.М. Волгин, Б.Н. Волков и др. //Исследование Земли из космоса.-1985.- N4. - С.21 - 30.

3. Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1987. - 173 с.

4. Кауль Б.В. Лазерное зондирование аэрозольных загрязнений атмосферы: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: ИОА СО АН СССР, 1978. - 180 с.

5. Зуев В.Е., Креков Г.М., Крекова М.М. Лазерное зондирование атмосферного аэрозоля (теоретические аспекты) //Дистанционное зондирование атмосферы. - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. - С.3 - 46.

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