

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.501.816:535.36

В.А. Коршунов

О многоволновом лидарном зондировании тропосферного аэрозоля с использованием сигналов комбинационного рассеяния

НПО «Тайфун», г. Обнинск Калужской обл.

Поступила в редакцию 25.08.2004 г.

Рассматривается задача об определении оптических и микрофизических параметров аэрозоля в условиях замутненной атмосферы по данным многоволнового лидарного зондирования с использованием сигналов комбинационного рассеяния (КР) на атмосферном азоте. Используется итерационная схема решения системы лидарных уравнений и восстановления указанных параметров, основанная на интегральных соотношениях, полученных с помощью преобразований Фернальда. Включенный в схему алгоритм обращения оптических характеристик базируется на априорной информации о форме функции распределения.

Введение

Исследование вертикального распределения концентрации и микрофизических параметров аэрозоля имеет важное значение для решения проблем радиационного баланса атмосферы, физики и химии аэрозоля, а также процессов переноса загрязняющих веществ в атмосфере. Многоволновое лидарное зондирование может дать ценную информацию в дополнение к контактными измерениям, так как позволяет проводить длительные непрерывные измерения с хорошим пространственным и временным разрешением. Задача определения параметров аэрозоля по коэффициентам обратного рассеяния на нескольких длинах волн, найденным из лидарных сигналов, относится к классу обратных задач и решается с применением тех или иных регуляризирующих алгоритмов [1, 2].

Известно, что включение в набор исходных данных вместе с коэффициентами обратного рассеяния еще и коэффициентов ослабления, полученных, например, с помощью сигналов обратного комбинационного рассеяния (КР) на одном из основных атмосферных газов, в существенной степени стабилизирует получаемые решения [1]. В последнее время развитие техники лидарного зондирования привело к появлению комбинированных лидаров, сочетающих традиционное многоволновое зондирование с приемом сигналов КР [3–6]. Среди них наибольший интерес представляют сравнительно простые системы, построенные на основе Nd:YAG-лазеров с преобразованием частоты во вторую и третью гармоники (длины волн несмещенных каналов 1064, 532 и 355 нм и каналов КР 387, 607 нм) [5, 6]. Это, в свою очередь, стимулировало появление новых подходов к интерпретации данных зондирования, в которых предлагались те или иные способы регуляризации решений, учитывающих специфику данной задачи [7–9]. Ни

один из развиваемых подходов не использовал в явном виде априорную информацию о функции распределения аэрозольных частиц по размерам, за исключением общих соображений о ее гладкости. Большинство численных экспериментов в [7–9] проведено с использованием одномодальных исходных функций распределения, и для них получено вполне удовлетворительное качество восстановления аэрозольных параметров. Между тем хорошо известно, что реальные аэрозольные распределения имеют как минимум две оптически активные фракции: субмикронную, включающую, в основном, частицы фотохимического происхождения, и более крупнодисперсную, которую образуют частицы почвенного происхождения, крупные солевые частицы и т.д. Для двухмодальных распределений результаты численных экспериментов не столь убедительны, в частности в [8] для восстановления двухмодального спектра использовались только незашумленные исходные сигналы обратного рассеяния. В отличие от [7–9] для получения решений, приближающихся к реально наблюдаемым распределениям, в данной работе рассматривается алгоритм, в явном виде учитывающий априорную информацию о функции распределения атмосферного аэрозоля.

При интерпретации данных многоволнового зондирования с учетом ослабления излучения вдоль трасы зондирования необходимо решать систему лидарных уравнений совместно с восстановлением микрофизических параметров аэрозоля. В отличие от ранее разрабатывавшихся итерационных схем решения системы лидарных уравнений многоволнового зондирования [1, 10], в которых проводилось численное решение лидарных уравнений, в данной работе при проведении итераций используются нелинейные интегральные соотношения, полученные интегрированием лидарных уравнений с помощью известного преобразования Фернальда [11], учитывающего как

рэлеевское, так и аэрозольное рассеяние. Это позволяет различным образом выбирать пространственное разрешение, в том числе проводить восстановление параметров для аэрозольных слоев с оптической толщиной, приближающейся к единице. В этом случае ограничением является возникновение эффектов многократного рассеяния, влияние которых можно оценить заранее.

Основные уравнения

Лидарное уравнение, связывающее измеряемые сигналы на длине волны λ_k ($k = 1, \dots, N_\lambda$) с оптическими параметрами атмосферы, имеет следующий вид:

$$F(\lambda_k, z) = [\beta_a(\lambda_k, z) + \beta_m(\lambda_k, z)] \times \exp \left[-2 \int_0^z [\sigma_a(\lambda_k, z') + \sigma_m(\lambda_k, z')] dz' \right], \quad (1)$$

где $F(\lambda_k, z) = A(\lambda_k)P_L(\lambda_k, z)z^2$, $A(\lambda_k)$ – аппаратная константа; z – расстояние вдоль трассы зондирования; $P_L(\lambda_k, z)$ – лидарный сигнал; $\beta_a(\lambda_k, z)$, $\beta_m(\lambda_k, z)$ – коэффициенты аэрозольного и молекулярного обратного рассеяния; $\sigma_a(\lambda_k, z)$, $\sigma_m(\lambda_k, z)$ – коэффициенты ослабления для аэрозольного и молекулярного рассеяния.

Коэффициенты $\beta_a(\lambda_k, z)$ и $\sigma_a(\lambda_k, z)$ связаны с аэрозольной функцией распределения с помощью известных интегральных соотношений, ядра которых для сферических частиц рассчитываются с использованием формул теории Ми [1].

Решение уравнения (1) для некоторой длины волны λ_k , полученное с использованием преобразования Фернальда, можно записать следующим образом (переменную λ_k для сокращения записи в (2) и (3) опустим):

$$\beta_a(z) = -\sigma_m(z) \theta_m + \frac{\hat{F}(z, t)}{1 + 2 \int_z^t \frac{\hat{F}(z', t)}{\theta_a(z')} dz'}; \quad (2)$$

$$\hat{F}(z, t) = \frac{F(z)\beta(z_g)}{F(z_g)} T^2(t, z_g) \times \exp \left[-2 \int_z^t \sigma_m(z') [1 - \theta_a(z')^{-1} \theta_m] dz' \right];$$

$$T^2(t, z_g) = T_m^2(t, z_g) T_a^2(t, z_g),$$

$$T_{a,m}^2(t, z_g) = \exp \left[-2 \int_t^{z_g} \sigma_{a,m}(z') dz' \right],$$

где t – произвольная точка на трассе зондирования; $\theta_a(z) = \beta_a(z)/\sigma_a(z)$ и $\theta_m = \beta_m(z)/\sigma_m(z)$ – величины, называемые лидарными отношениями для аэрозольного и молекулярного рассеяния (в литературе лидарными отношениями также могут называться и обрат-

ные отношения). Точка z_g является точкой привязки, в которой $\beta_a(\lambda_k, z)$ предполагается известной величиной. При $t \leq z$ величина $T(t, z)$ интерпретируется как прозрачность атмосферы на участке трассы (t, z) . Из лидарного сигнала величина $T^2(t, z)$ находится с помощью соотношения

$$T_a^2(t, z_g) = \frac{\exp \left[2 \int_t^{z_g} \theta_a(z')^{-1} \theta_m \sigma_m(z') dz' \right]}{1 + 2 \int_t^{z_g} \hat{F}(z', z_g) \theta_a(z')^{-1} dz'}. \quad (3)$$

Уравнение для сигналов КР $F(\lambda_{Rj}, z)$ на длине волны КР λ_{Rj} ($j = 1, \dots, N_R$, где N_R – число используемых каналов КР), соответствующей возбуждающей длине волны λ_j , запишем в виде

$$\ln \frac{F(\lambda_{Rj}, z_2)}{F(\lambda_{Rj}, z_1)} = \ln \frac{\rho(z_2)}{\rho(z_1)} - \int_{z_1}^{z_2} (\sigma_a(\lambda_j, z') + \sigma_a(\lambda_{Rj}, z') + \sigma_m(\lambda_j, z') + \sigma_m(\lambda_{Rj}, z')) dz', \quad (4)$$

где $\rho(z)$ – плотность атмосферы.

Из (4) находится сумма коэффициентов ослабления на длинах волн λ_j и λ_{Rj} , средняя по отрезку трассы $[z_1, z_2]$:

$$\langle \sigma_a(\lambda_{Rj}, z) + \sigma_a(\lambda_j, z) \rangle = \Delta z^{-1} \left(-\ln \frac{F(\lambda_{Rj}, z_2)}{F(\lambda_{Rj}, z_1)} + \ln \frac{\rho(z_2)}{\rho(z_1)} - \int_{z_1}^{z_2} (\sigma_m(\lambda_j, z') + \sigma_m(\lambda_{Rj}, z')) dz' \right). \quad (5)$$

Итерационная процедура решения лидарных уравнений

При обработке сигналов обратного рассеяния обычно считается, что плотность атмосферы и соответственно величина $\sigma_m(\lambda_k, z)$ известны. Если лидарное отношение для аэрозольного отношения $\theta_a(\lambda_k, z)$ на длине волны λ_k возможно задать из априорных соображений, то решение (2), взятое с $t = z_g$, дает профиль $\beta_a(\lambda_k, z)$, а следовательно, и профили $\sigma_a(\lambda_k, z)$ и $T(z, z_g)$ вдоль трассы зондирования.

При многоволновом зондировании уравнения (2) для всех длин волн решаются совместно итерационным методом. Входящие в них лидарные отношения определяются в процессе решения, при этом используются коэффициенты ослабления, найденные из формулы (5). Рассмотрим далее один из возможных вариантов построения такого решения.

Разобьем трассу зондирования на ряд отрезков, начиная с точки привязки: $z_g, z_1, z_2, \dots, z_k$. Как правило, точка z_g выбирается так, что аэрозольное рассеяние $\beta_a(\lambda_k, z)$ мало по сравнению с молекулярным в окрестности z_g . Поэтому в этой окрестности решение обратной задачи нецелесообразно из-за большой

погрешности определения коэффициентов ослабления и обратного рассеяния. Пусть (z_1, z_2) – ближайший к z_g отрезок трассы, для которого отношение средних коэффициентов аэрозольного и молекулярного обратного рассеяния $R_{am} = \langle \beta_a(\lambda_k, z_g) \rangle / \langle \beta_m(\lambda_k, z_g) \rangle$ возрастает до некоторого критического уровня R_{cr} ($\sim 0,1-0,2$). Поскольку $\beta_a(\lambda_k, z_g)$ мало на (z_g, z_1) , то можно провести расчет $T_a(z_1, z_g)$ с априорным заданием $\theta_a(\lambda_k, z)$, не внося при этом заметной погрешности из-за неточного учета прозрачности на отрезке (z_g, z_1) . В качестве априорной модели атмосферного аэрозоля можно использовать, например, оптико-локационную модель, описанную в [12]. Далее проводится решение задачи для последовательности отрезков трассы (z_1, z_2) , (z_2, z_3) и т.д., начиная с отрезка (z_1, z_2) , причем на каждом из отрезков, для которых $R_{am} \geq R_{cr}$, выполняется итерационная процедура, которая сводится к следующему.

На p -й итерации для q -го расчетного отрезка (z_q, z_{q+1}) в соотношениях (2) полагается $t = z_q$; $\theta_a(\lambda_k, z) = \theta_a(\lambda_k, z)^{(p)}$ и проводится расчет $\beta_a(\lambda_k, z)^{(p)}$ для всех точек отрезка $z_q \leq z \leq z_{q+1}$, после чего определяются средние по отрезку значения $\langle \beta_a(\lambda_k, z) \rangle^{(p)}$. (На 1-й итерации при малой оптической толщине отрезка расчет проводится при $\theta_a(\lambda_k, z)^{(1)} \rightarrow \infty$, т.е. в пренебрежении аэрозольным ослаблением на отрезке (z_1, z_2) , при больших оптических толщинах следует задать некоторое начальное значение $\theta_a(\lambda_k, z)^{(1)}$, например полученное на предыдущем отрезке трассы). Далее по набору средних по отрезку оптических коэффициентов $\{ \langle \beta_a(\lambda_k, z) \rangle^{(p)}, \langle \sigma_a(\lambda_{Rj}, z) \rangle + \sigma_a(\lambda_j, z) \}$ проводится восстановление микрофизических параметров аэрозоля, после чего вычисляются новые значения лидарных отношений $\theta_a(\lambda_k, z)^{(p+1)}$ и происходит переход к следующей $(p+1)$ -й итерации. После останова итераций по некоторому критерию сходимости проводятся расчет $T^2(\lambda_k, z_g, z_{q+1})$ и переход к следующему отрезку трассы [для 1-го отрезка $T^2(\lambda_k, z_g, z_1)$ находится на основе априорных данных о $\theta_a(\lambda_k, z)$]. Численная проверка показывает, что при $z_{q+1} < z_q$ итерации сходятся при любых оптических толщинах слоя, при $z_{q+1} > z_q$ сходимости отмечается при максимальной по длинам волн оптической толщине слоя, не превышающей 1.

При замене в соотношениях (2) и (3) зависящего от расстояния лидарного отношения на его эффективное значение возможно внесение ошибки в определяемую величину $\beta_a(\lambda_k, z)$. Для относительной ошибки ε_β средней по отрезку (z_q, z_{q+1}) величины $\langle \beta_a(\lambda_k, z) \rangle$ справедлива следующая оценка сверху: $\varepsilon_\beta \leq \varepsilon_\theta C |1 - D| / (1 + \beta_a \beta_m^{-1})_{eff}$, где ε_θ – величина относительной вариации лидарного отношения около его среднего значения; C – множитель, равный 0,5 при малых оптических толщинах и возрастающий до 1 при увеличении оптической толщины отрезка трассы до 1 и более, в знаменателе стоит усредненная по отрезку с некоторым весом величина $1 + \beta_a(z) \beta_m^{-1}(z)$, значение D определяется выражением

$$D(z) = \exp \left[-2 \int_z^{z_{q+1}} \sigma_a(z') dz' \right] \exp \left[-2 \int_z^{z_{q+1}} \sigma_m(z') \theta_a^{-1}(z') \theta_m dz' \right]. \quad (6)$$

При уменьшении оптической толщины $D(z) \rightarrow 1$, а при ее увеличении в случае $z < z_{q+1}$ величина $D(z) \rightarrow 0$. Условие $z < z_{q+1}$ выполняется в случае выбора точки привязки z_g в конце трассы зондирования.

Из приведенной оценки следует, что ошибка определения $\beta_a(\lambda_k, z)$ заведомо мала в двух случаях: во-первых, когда вариации лидарного отношения ε_θ на отрезке (z_q, z_{q+1}) малы, при этом нет ограничений на оптическую толщину отрезка (z_q, z_{q+1}) ; во-вторых, при малой оптической толщине отрезка (z_q, z_{q+1}) как по аэрозольному, так и по молекулярному ослаблению.

Алгоритм восстановления микрофизических параметров

Алгоритм восстановления микрофизических параметров аэрозольных частиц является частью описанной выше итерационной процедуры. Наряду с восстановлением спектра размеров производится выбор наиболее подходящей микрофизической модели аэрозоля из некоторого заданного количества возможных моделей. В целом алгоритм восстановления строится на основе общих идей, изложенных в [1]. В соответствии с небольшим объемом исходного экспериментального материала (от 3 до 5 оптических коэффициентов) спектр размеров аэрозольных частиц представляется в виде гистограммы f_i из $N_r = 8$ столбцов, расположенных равномерно на логарифмической шкале размеров от $r_{min} = 0,05$ до $r_{max} = 3,0$ мкм. При дополнительном предположении о гладкости хода функции распределения частиц по размерам интегральные соотношения для оптических коэффициентов известным образом приводятся к линейным матричным соотношениям:

$$\beta_{ak} = \sum_{i=1}^n B_{ki} f_i, \quad \sigma_{ak} = \sum_{i=1}^n C_{ki} f_i.$$

При этом элементы матриц B_{ki} и C_{ki} (размерности $N_\lambda \times N_r$, где N_λ – число длин волн зондирования) для каждой модели рассчитываются заранее. При задании моделей используется представление о внутренней смеси компонентов аэрозоля, когда частицы данного размера характеризуются одним комплексным показателем преломления, зависящим от длины волны. В общем случае частицы могут быть несферическими. По данным последних измерений глобальной сети AERONET [13], модель сферических частиц применима для аэрозолей промышленных районов, а также для аэрозолей, образуемых продуктами горения биомассы. В то же время она явно непригодна для аэрозоля аридного происхождения (аэрозоль Сахары, азиатская пыль), когда аэрозоль состоит, в основном, из частиц неправильной формы и дает степень деполяризации лидарного сигнала до 40%. Однако такие случаи можно селективировать на основании измерения степени деполяризации.

С целью введения априорной информации используется двухступенчатая схема восстановления функции распределения [14], когда решение для функции распределения f_i ищется в виде

$$f_i = g(r_i, \gamma) + s_i,$$

где $g(r_i, \gamma)$ – априорная функция распределения со свободными параметрами γ ; s_i – поправка. На первом этапе методами нелинейной оптимизации находятся параметры γ_0 , удовлетворяющие условию минимума невязки. Процедура минимизации повторяется для всех заданных микрофизических моделей, и по минимуму невязки выбирается также наиболее подходящая модель. Если полученная на первом этапе невязка δ превышает некоторый критический уровень δ_0 , то инициируется второй этап решения, когда ищется поправка s_i к полученному модельному решению с использованием метода регуляризации по Тихонову [15]. При этом проводится прямая минимизация регуляризирующего функционала с применением метода штрафных функций [16] для исключения отрицательных решений. Параметр регуляризации определяется по невязке [15].

Существенным является вопрос о задании типа априорной функции распределения. Однопараметрическое распределение типа Юнге [14] не учитывает реальный двухмодальный вид спектров. В некоторых моделях, например [17], используются двухмодальные распределения, являющиеся суммой двух логарифмически нормальных распределений и имеющие пять свободных параметров. Для задания априорной информации в такой модели требуется наложить определенные ограничения на область изменения параметров и задать их корреляционную связь. Сделать это затруднительно, поскольку число параметров слишком велико и в выражение для $\lg g(r)$ некоторые параметры входят нелинейно. Поэтому для целей данной работы предлагается взять более простую 3-параметрическую модель и использовать сочетание параметрического и статистического методов введения априорной информации. Для этого априорная функция распределения $g(r_i, \gamma)$ представляется в виде (рис. 1):

$$\lg[g(r_i, \gamma)] = \gamma_3 + (c_i + b_i \gamma_m)(\lg r_i - \lg r_5), \quad (7)$$

где $m = 1$ для левой (субмикронной) ветви спектра ($i = 1 \div 4$) и $m = 2$ для правой ветви ($i = 6 \div 8$). Пятый столбец гистограммы является границей между двумя частями спектра. Коэффициенты $c_3 = c_5 = c_7 = b_3 = b_7 = 0$, $b_3 = b_7 = 1$, остальные коэффициенты c_i, b_i определяются способом, описанным ниже. Компоненты γ_1, γ_2 и γ_3 вектора γ являются свободными параметрами. Из уравнения (7) следует, что $\gamma_3 = \lg g(r_5, \gamma)$, $\gamma_1 = v_{35}$, $\gamma_2 = v_{75}$, где $v_{i5} = [\lg g(r_i, \gamma) - \lg g(r_5, \gamma)] / (\lg r_i - \lg r_5)$ для $i \neq 5$. Параметр γ_3 определяет значение функции распределения для $r = r_5$ и влияет только на общее содержание аэрозоля. Параметры γ_1 и γ_2 определяют крутизну подъема в левой и правой по отношению к r_5 ветвях спектра.

Из уравнения (7) получаем линейную связь

$$v_{i5} = c_i + b_i v_{L5}, \quad (8)$$

где $L = 3$ для левой ветви ($i = 1, 2, 4$) и $L = 7$ для правой ветви ($i = 6, 8$). Следовательно, коэффициенты c_i, b_i для $i = 1, 2, 4, 6, 8$ могут быть опреде-

лены как коэффициенты линейной регрессии, если соотношение (8) применить для линейного регрессионного анализа к некоторому ансамблю эмпирических функций распределения, полученных в экспериментах *in situ* либо в других измерениях, которые по отношению к лидарному зондированию рассматриваются как априорные.

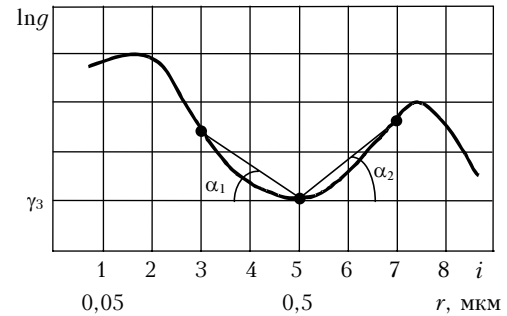


Рис. 1. К определению априорной функции распределения. На оси абсцисс показаны номера точек гистограммы i и радиусы частиц r . Свободные параметры $\gamma_1 = \operatorname{tg} \alpha_1$, $\gamma_2 = \operatorname{tg} \alpha_2$, $\gamma_3 = \lg(r_5)$

В качестве первого приближения был рассмотрен ансамбль из 24 спектров, сформированный на основе известных литературных данных по измерениям аэрозольных спектров в пограничном слое и в свободной тропосфере для различных типов аэрозоля (городской, сельский и т.д.) [18–26]. Пример полученных корреляционных связей, описываемых уравнением (8), представлен на рис. 2.

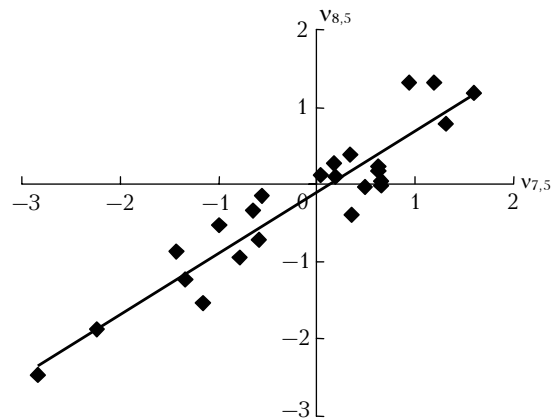


Рис. 2. Статистическая связь параметров v_{75} и v_{85} для набора эмпирических функций распределения

В результате проведенного анализа для спектров в S -представлении (распределение площадей поверхности частиц) получено, что средние значения коэффициентов $\langle v_{35} \rangle = -1,245$, $\langle v_{75} \rangle = -0,1444$, а их среднеквадратические вариации $\delta v_{35} = 0,7386$, $\delta v_{75} = 1,103$. Средние значения коэффициентов b_i, c_i и их среднеквадратические вариации приведены в таблице.

В дальнейшем предполагается провести подобный анализ для отдельных типов аэрозолей разного происхождения.

Средние значения $\langle b_i \rangle$, $\langle c_i \rangle$ коэффициентов b_i , c_i и их вариации δb_i , δc_i ($i = 1-8$)

| | | | | | | | | |
|-----------------------|--------|---------|-----|--------|-----|---------|-----|----------|
| $\langle b_i \rangle$ | 0,6106 | 0,7571 | 1,0 | 1,121 | 0,0 | 1,174 | 1,0 | 0,7903 |
| δb_i | 0,13 | 0,089 | 0,0 | 0,21 | 0,0 | 0,10 | 0,0 | 0,063 |
| $\langle c_i \rangle$ | 0,416 | 0,08813 | 0,0 | 0,1507 | 0,0 | -0,1974 | 0,0 | -0,09992 |
| δc_i | 0,092 | 0,095 | 0,0 | 0,36 | 0,0 | 0,14 | 0,0 | 0,061 |

Заключение

Рассмотрена итерационная схема решения системы лидарных уравнений многоволнового и комбинационного рассеяния с одновременным определением микрофизических параметров аэрозоля. При ее построении использованы интегральные соотношения, полученные с помощью известных преобразований Фернальда [11]. При обращении оптических характеристик применяется двухступенчатый алгоритм, на первом этапе которого используется априорная информация статистического характера о форме аэрозольной функции распределения.

Ранее рассматривались поточечные итерационные схемы решений уравнений многоволнового зондирования [1, 10]. В этом случае при переходе от точки к точке трассы одновременно осуществляется численное решение лидарных уравнений и решение обратной задачи. При этом для уменьшения квадратурных погрешностей точки трассы должны выбираться достаточно близко друг к другу. В случае обработки реальных сигналов возникают определенные трудности, поскольку, как правило, сигналы зашумлены, а параметры аэрозольной среды флуктуируют от точки к точке. Поэтому предварительно необходимы то или иное усреднение или сглаживание сигналов вдоль трассы зондирования. Наиболее естественным методом сглаживания, на наш взгляд, является использование интегральных соотношений типа (2), поскольку они являются точными интегралами лидарных уравнений с учетом как рэлеевского, так и аэрозольного рассеяния. Поэтому предлагаемую итерационную схему можно рассматривать как некоторое обобщение предложенной ранее поточечной схемы решения системы уравнений многоволнового зондирования.

Итерационные схемы могут быть построены в двух вариантах в зависимости от того, какие оптические характеристики выбираются для решения обратной задачи — коэффициенты обратного рассеяния или ослабления [1, 10]. На наш взгляд, при зондировании атмосферного аэрозоля с привязкой сигналов по молекулярному рассеянию на больших высотах естественно использовать вариант с итерированием коэффициентов обратного рассеяния. Действительно, при распространении решения от точки привязки находятся именно коэффициенты обратного рассеяния и в начале итераций сразу же имеется хорошее первое приближение для этих коэффициентов. В процессе итераций вводится поправка на ослабление, которая в данном случае мала. Если же итерировать коэффициенты ослабления, то уже на первой итерации надо вводить априорные величины лидарных отношений и решение может сильно зависеть от выбора априорных величин.

Описанная в работе схема применялась для обработки данных реальных экспериментов по многоволновому зондированию с использованием дополнительного канала комбинационного рассеяния на длине волны 387 нм [6]. С целью исследования возможностей комбинированного многоволнового комбинационного зондирования проведен обширный цикл численных экспериментов по зондированию атмосферного аэрозоля с помощью Nd:YAG-лазеров. Результаты предполагается представить в отдельной публикации.

1. *Наац И.Э.* Теория многочастотного лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1980. 156 с.
2. *Зуев В.Е., Наац И.Э.* Обратные задачи оптики атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1990. 286 с.
3. *Müller D., Wandinger U., Althausen D., Mattis I., Ansmann A.* Retrieval of physical particle properties from lidar observations of extinction and backscatter at multiple wavelengths // *Appl. Opt.* 1998. V. 37. N 12. P. 2260–2263.
4. *Althausen D., Müller D., Ansmann A., Wandinger U., Hube H., Clauer E., Zörner S.* Scanning 6-wavelength 11-channel aerosol lidar // *J. of Atmosph. and Ocean. Technol.* 2000. V. 17. 1469–1482.
5. *Schneider J., Eixmann R.* Three years of routine Raman lidar measurements of tropospheric aerosols: Backscattering, extinction, and residual layer height // *Atmosph. Chem. and Phys.* 2002. V. 2. P. 313–323.
6. *Chen B., Khmelevtsov S., Korshunov V., Vdovenkov A.* Multiwavelength aerosol and Raman lidar // *Proc. of 21 ILRC, Part I. Québec, Canada, 2002.* P. 6568.
7. *Müller D., Wandinger U., Ansmann A.* Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: theory // *Appl. Opt.* 1999. V. 38. N 12. P. 2346–2357.
8. *Böckmann C.* Hybrid regularization method for the ill-posed inversion of multiwavelength lidar data to retrieve // *Appl. Opt.* 2001. V. 40. N 9. P. 1329–1342.
9. *Veselovskii A., Kolgotin V., Griaznov D., Müller D., Wandinger U., Whiteman D.* Inversion with regularization for the retrieval of tropospheric aerosol parameters from multiwavelength lidar sounding // *Appl. Opt.* 2002. V. 41. N 18. P. 3685–3699.
10. *Rajeev K., Parameswaran K.* Iterative method for the inversion of multiwavelength lidar signal to determine aerosol size distribution // *Appl. Opt.* 1998. V. 37. N 21. P. 4690–4700.
11. *Fernald F.* Analysis of atmospheric lidar observations: some comments // *Appl. Opt.* 1984. V. 23. P. 652.
12. *Креков Г.М., Рахимов Р.Ф.* Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982. 197 с.
13. *Dubovik O., Holben B., Lapyonok T., Synyuk A., Mischenko M., Yang P., Slutsker I.* Non-spherical aerosol retrieval method employing light scattering by spheroids // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. N 10. 10.1029/2001GL014506.

14. *Осипенко Ф.П., Чайковский А.П., Щербаков В.Н.* Вариации микроструктуры и статистические характеристики коэффициентов обратного рассеяния аэрозоля пограничного слоя по данным многоволнового зондирования // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1989. Т. 25. № 7. С. 717–722.
15. *Тихонов А.Н., Арсенин В.А.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974. 223 с.
16. *Гилл Ф., Мюррей У., Райт М.* Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985. 509 с.
17. *Hess M., Koepke P., Schult I.* Optical properties of aerosol and clouds: the software package OPAC // Bull. of the Amer. Meteorol. Soc. 1998. V. 79. N 5. P. 831–844.
18. *Haysaka T., Neguro Y., Sasano Y., Takamura T.* Stratification and size distribution of aerosols derived from simultaneous measurements with lidar and radiometers // 17 ILRC. Sendai, Japan, 1994. Abstracts of Papers. P. 24.
19. *Reiter R., Sladkovic R., Carnuth W.* Results of 11-year's measurements of aerosol particles spectra at 0.7, 1.8 and 3.0 km altitude // Phys.-Chem. Behav. Atm. Pollutants: Proc. 2-nd Eur. Symp. Varese, 1981. Dordrecht, 1982. P. 236–241.
20. *Patterson E., Gillette D.* Commonalities in measured size distribution for aerosol having a solid derived components // J. Geoph. Res. 1977. V. 15. P. 2074–2082.
21. *Hobbs P., Radke L., Hindman E.* An integrated airborne particle-measuring facility and its preliminary use in atmosphere aerosol studies // J. Aerosol. Sci. 1976. V. 7. Is. 3. P. 195–202.
22. *Davies C.* Size distribution of atmospheric particles // J. Aerosol. Sci. 1974. V. 5. Is. 3. P. 293–300.
23. *Whitby K.* The physical characteristics of sulfur aerosols // Atmos. Environ. 1978. V. 12. P. 135–159.
24. *Sverdrup G., Whitby K., Clark W.* Characterization of California aerosol. II. Aerosol size distribution in the Mojave Desert // Atmos. Environ. 1975. V. 9. P. 483–494.
25. *Tanaka M., Nakajima T., Takamura T.* Simultaneous determination of complex refractive index and size distribution of airborne and water suspended particles from light scattering measurements // J. Meteorol. Soc. Jap. 1982. V. 60. P. 1259–1272.
26. *Смирнов В.В.* Характерные особенности дисперсного состава аридного аэрозоля: Советско-американский эксперимент по изучению аридного аэрозоля / Под ред. Г.С. Голицина. СПб., 1992. С. 143–154.

V.A. Korshunov. Multiwavelength lidar sensing of tropospheric aerosol using Raman scattering signals.

The problem of determination of optical and microphysical parameters of aerosol in turbid atmosphere on the base of multiwavelength lidar sensing including Raman signals from atmosphere nitrogen is discussed. Solution of lidar equations along with retrieval of aerosol parameters is performed by iteration scheme with using of integral relations obtained by means of Fernald transformation. Algorithm of retrieval of optical parameters in the iteration scheme is based on *a priori* information on the aerosol distribution function.