

Ю.В. Кистенев, И.А. Шевчук

ЗОНДИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Представлены результаты численного моделирования методики одно- и двухчастотного зондирования оптических параметров атмосферного аэрозоля с использованием нелинейного спектроскопического эффекта насыщения коэффициента поглощения резонансной компоненты среды. Рассмотрено влияние помех канала распространения и погрешности спектроскопической информации на точность восстановления этих параметров.

1. Введение

При определении оптических параметров атмосферного аэрозоля возникает проблема разделения коэффициентов обратного рассеяния и ослабления.

Обращение данных зондирования относительно микрофизических параметров аэрозоля возможно при многочастотном зондировании. Однако этот метод целесообразно применять, если количество измерительной информации ограничено (зондирование ведется на двух-трех длинах волн), а исследуемый объект относится к классу достаточно изученных аэрозолей, так как в качестве априорной используется информация о виде решения [1]. При зондировании на одной, двух длинах волн зачастую используется априорная информация о лидарном отношении.

При практической реализации многочастотного зондирования возникают сложности, связанные с выбором длин волн, на которых следует проводить измерения так, чтобы они были информативны относительно исследуемого аэрозоля [1].

В [2] была показана принципиальная возможность раздельного измерения оптических параметров атмосферного аэрозоля при использовании нелинейных эффектов.

Целью данной работы является моделирование одно- и двухчастотного зондирования оптических параметров атмосферного аэрозоля в условиях насыщения резонансного поглощения молекулярной компоненты среды. Выбор данного нелинейного эффекта обусловлен наиболее низким порогом его возбуждения среди прочих в условиях атмосферы [3, 4].

2. Постановка задачи

Для описания структуры энергетических уровней молекулы используется двухуровневая модель резонансно-поглощающей газовой частицы.

В случае нелинейного стационарного взаимодействия излучения с резонансной компонентой среды, т.е. с газом, и линейного – с аэрозолем уравнение распространения для плоской волны записывается в известном виде:

$$dI/dz = -\beta_{\text{ex}}^{\text{M}} I / (1 + I/I_s) - \beta_{\text{ex}}^{\text{H}} I, \quad (1)$$

где $\beta_{\text{ex}}^{\text{M}}$, $\beta_{\text{ex}}^{\text{H}}$ – объемные коэффициенты резонансного поглощения и нерезонансных потерь; I_s – интенсивность насыщения резонансного перехода.

Решение задачи (1) представлялось в виде неявной функции и находилось итерационным методом бисекций [5].

Анализ показал [2], что обратная задача разрешима при посылке в среду трех зондирующих импульсов с переменной начальной интенсивностью. Например, в качестве условий измерений могут быть выбраны условия линейного, слабонелинейного и сильнонелинейного взаимодействий.

В этих условиях сигналы рассеяния могут быть представлены в виде

$$P_1(\lambda_1) = \beta_\pi(z) W_1(0) \exp[-2(\tau^m + \tau^h)]; \quad (2a)$$

$$P_2(\lambda_2) = \beta_\pi(z) W_2(z, \tau^m, \tau^h, I_s) \exp[-(\tau^m + \tau^h)]; \quad (2б)$$

$$P_3(\lambda_1) = \beta_\pi(z) W_3(z, \tau^m, \tau^h, I_s) \exp[-(\tau^m + \tau^h)], \quad (2в)$$

где W_2, W_3 – энергии мощных лазерных импульсов, прошедших расстояние z в среде, которые рассчитываются из соответствующей задачи распространения с учетом нелинейного взаимодействия; τ^m, τ^h – оптические толщии резонансной и нерезонансной компонент среды; P_j – измеренные сигналы обратного рассеяния.

Функциональные соотношения для неизвестных оптических параметров атмосферы определяются в предположении, что рассеяние происходит, главным образом, на частицах атмосферного аэрозоля (пренебрежение рэлеевским рассеянием): $\beta_\pi^m(z) \ll \beta_\pi^h(z)$, которое, как правило, справедливо в видимом и ИК-диапазонах.

В качестве исходных данных для решения обратной задачи зондирования использовались отношения сигналов обратного рассеяния $P_1/P_2, P_1/P_3, P_2/P_3$. Следует отметить, что эти отношения зависят только от τ^m, τ^h . При моделировании процесса зондирования эти сигналы рассчитывались из уравнений (1), (2) для выбранных заранее оптических параметров среды.

Решение обратной задачи находилось методом перебора на априори заданном интервале значений τ_x^m, τ_x^h : для различных значений τ_x^m, τ_x^h из этих интервалов рассчитывались сигналы обратного рассеяния P_{1x}, P_{2x}, P_{3x} в соответствии с известными закономерностями распространения оптического излучения в среде. Восстанавливаемые значения параметров среды τ^m, τ^h находились из условия максимального совпадения величин P_1/P_2 и $P_{1x}/P_{2x}, P_1/P_3$ и $P_{1x}/P_{3x}, P_2/P_3$ и P_{2x}/P_{3x} соответственно. В расчетах данная задача сводилась к задаче минимизации следующей функции:

$$F = (P_1/P_2 - P_{1x}/P_{2x})^2 + (P_3/P_1 - P_{3x}/P_{1x})^2 + (P_2/P_3 - P_{2x}/P_{3x})^2. \quad (3)$$

Восстановление коэффициента обратного рассеяния β_π возможно из уравнения (2a) после измерения τ^m, τ^h .

3. Результаты

3.1. Однородный слой среды

Описываемый метод может быть использован как при одночастотном, так и при двухчастотном зондировании.

В случае одночастотного зондирования ($\lambda_1 = \lambda_2$) длина волны излучения, с одной стороны, должна попадать в область резонансного поглощения среды, а с другой – находиться в области эффективного взаимодействия излучения с исследуемым аэрозолем.

Проведенные исследования зависимости точности восстановления оптических толщ от интенсивностей мощных зондирующих импульсов I_1, I_2 показали, что величина погрешности восстановления слабо зависит от интенсивности излучения, лишь бы I_2, I_3 было больше I_s и отношение этих интенсивностей – было больше двух.

Ниже представлены результаты восстановления величины оптической толщи резонансной и нерезонансной компонент среды при одночастотном зондировании однородного слоя среды при начальной максимальной интенсивности мощных зондирующих импульсов $I_2/I_s = 0,5$ и $I_3/I_s = 2$ (импульсы имели гауссову форму).

На рис. 1 изображен график зависимости средней погрешности восстановления оптической толщи компонент среды $(\delta\tau^m + \delta\tau^h)/2$ в отсутствие помех канала распространения (аддитивной погрешности) δ^a . Из рисунка видно, что надежное восстановление параметров среды при используемых исходных данных начинается со значения оптических толщ резонансной и нерезонансной компонент порядка 0,2.

Рис. 2 иллюстрирует зависимость средней погрешности восстановления параметров среды $(\delta\tau^m + \delta\tau^h)/2$ от величины аддитивной погрешности. Видно, что погрешность восстановле-

ния составляет величину порядка аддитивной погрешности и уменьшается с увеличением оптической толщи среды.

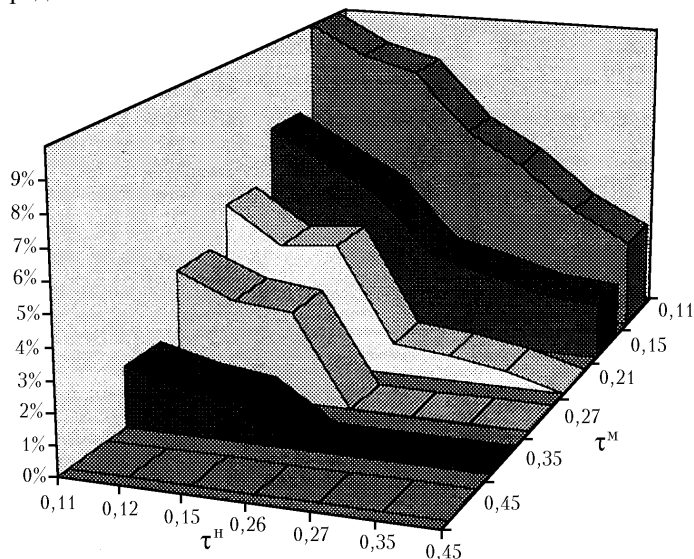


Рис. 1. Средняя погрешность восстановления оптических толщ компонент среды $(\delta\tau^M + \delta\tau^H)/2$ в зависимости от величин. Условия расчета: $\delta^a = 0$

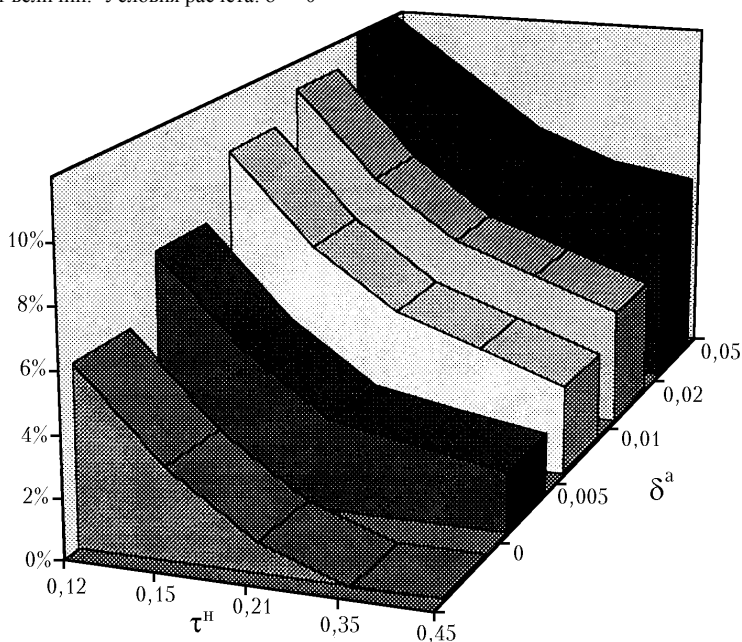


Рис. 2. Средняя погрешность восстановления оптических толщ компонент среды $(\delta\tau^M + \delta\tau^H)/2$ в зависимости от величин τ^H и δ^a . Условия расчета: $\tau^M = 0,26$

Было также исследовано влияние точности используемой спектроскопической информации, в частности влияние величины интенсивности насыщения среды на погрешность восстановления. Выявлено, что погрешность восстановления слабо зависит от точности задания этого параметра.

Расчеты показали, что погрешность восстановления имеет тот же знак, что и вводимая аддитивная погрешность. Следовательно, при нулевом математическом ожидании аддитивной погрешности можно ожидать, что усреднение восстановленных параметров среды по серии измерений будет существенно снижать влияние этой погрешности.

Эффект насыщения резонансного поглощения может быть использован также и в двухчастотном лазерном зондировании атмосферного аэрозоля как модификация метода дифференциального поглощения [2]. В этом случае дополнительно к зондированию на длинах волн λ_1 и λ_2 в условиях линейного взаимодействия, как в методе дифференциального поглощения,

посылается третий импульс – мощный – на длине волны λ_1 . Сигналы рассеяния первых двух импульсов дают, как обычно, информацию об оптической толщине газовой компоненты τ^M , а третий позволяет определить параметры β_p^H , τ^H аэрозоля.

Для реализации метода длина волны λ_1 должна попадать в контур линии резонансного поглощения среды, в другая – λ_2 – в соседнее с линией микроокно прозрачности атмосферы.

Ниже представлены зависимости погрешности восстановления оптических толщ компонент однородного слоя среды при двухчастотном зондировании.

Расчеты показывают, что при увеличении оптической толщи погрешность восстановления снижается.

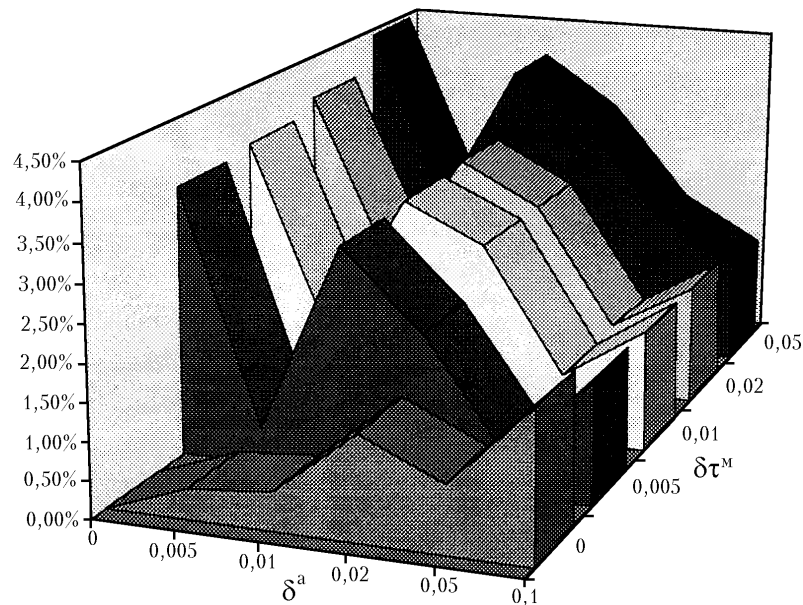


Рис. 3. Расчет погрешности $\delta\tau^H$ в зависимости от величин $\delta\tau^M$ и δ^a . Условия расчета: $\tau^M = 0,35$, $\tau^H = 0,49$

На рис. 3 показана зависимость погрешности восстановления оптической толщи нерезонансной компоненты среды от аддитивной погрешности δ^a и погрешности восстановления τ^M по методу дифференциального поглощения в условиях линейного взаимодействия излучения со средой $\delta\tau^M$. Расчеты проводились для $I_3/I_s = 5$. Видно, что величина $\delta\tau^M$ мало влияет на результат восстановления.

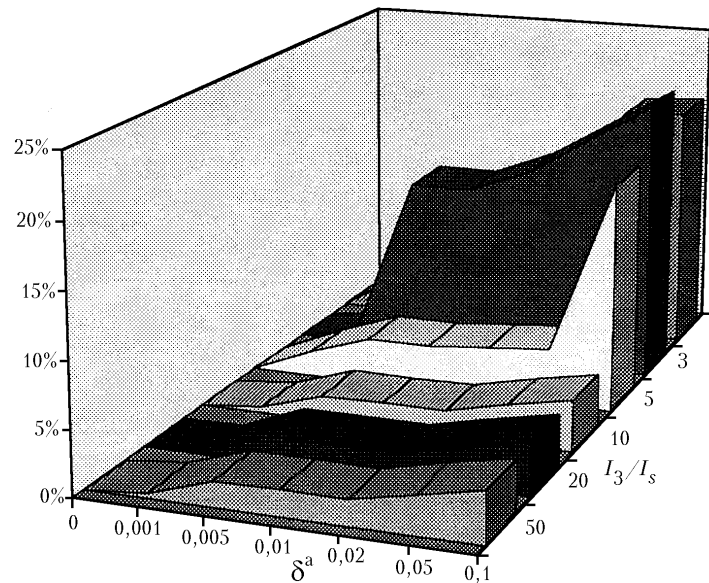


Рис. 4. Расчет погрешности $\delta\tau^H$ в зависимости от величин δ^a и I_3/I_s . Условия расчета: $\tau^M = 0,35$, $\tau^H = 0,49$

Рис. 4 иллюстрирует влияние величины начальной интенсивности мощного импульса на результат восстановления. Данные показывают, что с увеличением этой интенсивности влияние аддитивной погрешности существенно снижается.

3.2. Неоднородный слой среды

Для неоднородных атмосферных трасс вышеописанный алгоритм зондирования может быть использован для послойного восстановления параметров среды.

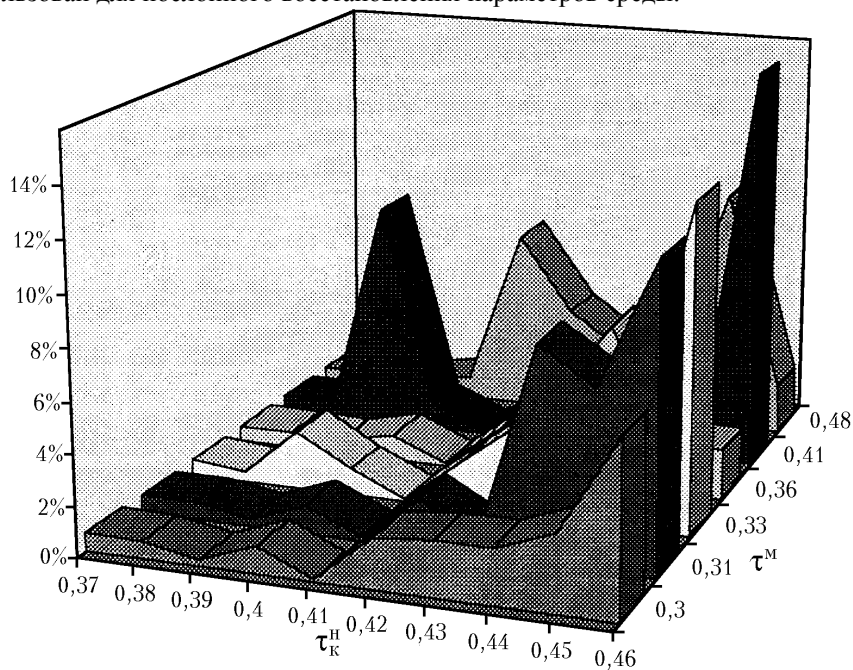


Рис. 5. Расчет погрешности $\delta\tau^H$ в неоднородной среде в зависимости от величин оптических толщ τ^M , τ^k , где k – номер слоя. Условия расчета: $\delta^a = 0,001$, $I_3/I_5 = 10$

На рис. 5 показан пример такого послойного восстановления оптических толщ компонент неоднородной среды при двухчастотном зондировании. В данном случае расчеты проведены для однородного распределения молекулярной компоненты среды и неоднородного – для аэрозольной. Расчеты показали, что в присутствии аддитивной погрешности погрешность восстановления увеличивается с увеличением номера слоя, причем чем больше оптическая толщина, тем меньше сказывается влияние аддитивной погрешности. Отметим, что однородность пространственного распределения молекулярной компоненты не является принципиальным ограничением метода, такой выбор связан с удобством графического представления информации.

Заключение

В статье рассмотрены одно- и двухчастотные методы зондирования оптических параметров атмосферного аэрозоля с использованием эффекта насыщения резонансного поглощения молекулярной компоненты среды.

Результаты расчетов показали, что выход за рамки линейного взаимодействия позволяет проводить раздельное измерение коэффициентов обратного рассеяния и ослабления атмосферного аэрозоля с приемлемым уровнем погрешности восстанавливаемых данных. Полученные данные показывают, что достаточно надежное восстановление этих параметров начинается со значений оптической толщи $\tau^M \geq 0,1 - 0,3$.

Рассмотрим пример реализации методики зондирования с использованием эффекта насыщения. Если зондирование проводить с помощью CO_2 -лазера, в качестве резонансной компоненты среды можно использовать атмосферный CO_2 . При этом, учитывая, что указанный газ имеет достаточно равномерное и стабильное распределение в пространстве, объем измеряемой информации может быть снижен. Типичные значения коэффициента аэрозольного

ослабления для слабозамутненной атмосферы в этой области спектра составляют величину порядка $0,1 \text{ км}^{-1}$ [2], следовательно, пространственное разрешение данного метода, по нашим оценкам, составляет примерно 1–3 км.

Для увеличения пространственного разрешения следует использовать источники излучения в видимой области спектра с соответствующим выбором резонансных газов, поскольку там коэффициент аэрозольного ослабления имеет существенно большее значение. С увеличением замутненности атмосферы пространственное разрешение метода будет расти.

1. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самахвалов И.В. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Новосибирск: Наука, 1986. 185 с.
2. Кистенев Ю.В., Шевчук И.А. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N. 12. С. 1557–1560.
3. Агеев Б.Г., Пономарев Ю.Н., Чистякова Л.К. // Известия вузов. Физика. 1982. N. 10. С. 49–51.
4. Землянов А.А., Кабанов А.М. // Тезисы докладов II Межреспубликанского симпозиума «Оптика атмосферы и океана». Томск.: ИОА СО РАН, 1995. Ч. 1. С. 171–173.
5. Плис А.И., Сливина Н.А. Лабораторный практикум по высшей математике. М.: Высшая школа, 1983. 208 с.

Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова,
Томск

Поступила в редакцию
28 июня 1995 г.

Yu. V. Kistenev, I. A. Shevchuk. Sounding of Optical Parameters of Atmospheric Aerosol Using Nonlinear Spectroscopical Effects.

Results of numerical simulation of one- and two-frequency sounding of atmospheric aerosol optical parameters using nonlinear spectroscopic effect of resonance absorption saturation are shown. Computation includes estimates of influence of interference channel of propagation and accuracy of spectroscopic data on aerosol parameters restoration error.