

## ДИСТАНЦИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

**Б.П. Иваненко, К.И. Гобрусенко**

### КОМПЛЕКСНОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ ТЕРМИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ

Предлагается комплексный подход к решению задачи дистанционного термического зондирования атмосферы, который основан на совместной обработке данных активного (лидар) и пассивного (радиометр) спутникового дистанционного зондирования атмосферы. Рассматриваются методы решения обратных задач спутниковой ИК-радиометрии, позволяющие усваивать и использовать информацию о восстанавливаемом профиле температуры, получаемую с помощью бортовых лидаров. Эффективность алгоритмов исследуется в численных экспериментах.

В последнее время наряду с традиционными пассивными методами дистанционного термического зондирования атмосферы (ДТЗА) стали изучаться и методы активного лидарного зондирования. Так, в рамках программы «Schuttle Atmospheric Lidar System» было проведено численное моделирование двух-, трехчастотной лидарной системы, предназначенной для ДТЗА, по методу разделения аэрозольных и молекулярных компонент в принимаемых лидарных сигналах [1, 2]. В результате оказалось, что основным преимуществом лидарного метода является более высокое вертикальное разрешение (0,2–2 км) по сравнению с пассивными методами ДТЗА, а к недостаткам его следует отнести ограниченный ресурс работы лидара, значительное энергопотребление, низкое горизонтальное разрешение (200–3000 км) и возможное смещение восстановленного профиля температуры за счет ошибок априорного задания спектрального хода коэффициентов аэрозольного и молекулярного светорассеяния при разделении аэрозольных и молекулярных компонент в принимаемых локационных сигналах.

В данной статье предлагается комплексный подход к решению задачи ДТЗА, основанный на совместной обработке данных активного (лидар) и пассивного (радиометр HIRS-II) спутникового ДТЗА. В такой постановке бортовой лидар служит для качественного восстановления профилей температуры с высоким пространственным разрешением с последующим их включением в математическую схему обработки данных, полученных с HIRS-II. Это, в свою очередь, требует создания специализированных алгоритмов решения обратных задач (ОЗ) ДТЗА, позволяющих усваивать и использовать информацию о восстанавливаемом профиле температуры, получаемую с помощью бортовых и наземных лидаров, а также данных радиозондирования и контактных измерений.

#### 1. Алгоритмы решения ОЗ комплексного ДТЗА

Известно, что пассивный метод ДТЗА основан на решении интегрального уравнения переноса излучения, простейший линеаризованный аналог которого можно записать в следующем виде [2]:

$$I(\nu) = B[\nu, T(1)]P[\nu, T(1)] - \int_0^1 K(\nu; B[\bar{\nu}, T(\xi)])B[\bar{\nu}, T(\xi)]d\xi, \quad (1)$$

где  $I(\nu)$  — интенсивность уходящей радиации с учетом вклада подстилающей поверхности для частоты  $\nu$ ;  $B(\bar{\nu}, T(\xi))$  — линеаризованная функция Планка для некоторой центральной частоты  $\bar{\nu}$ ;  $P[\nu, T(\xi)]$  — функция пропускания атмосферы;  $K(\nu, B[\bar{\nu}, T(\xi)]) = dP[\nu, T(\xi)]/d\xi$  — ядро уравнения (1);  $T(\xi)$  — профиль температуры;  $p$  — давление;  $\xi = p/p_0$  — переменная интегрирования, а  $p_0$  — давление у поверхности Земли.

Различные физические и математические аспекты решения уравнения (1) применительно к практике ДТЗА достаточно подробно изложены в [2, 3].

Далее на конкретном примере рассматривается схема построения специализированного алгоритма, предназначенного для обработки данных комплексного ДТЗА и в численном эксперименте исследуется его эффективность и точностные характеристики.

Для краткости и простоты изложения запишем уравнение (1) в операторной форме:

$$Kb = I, \quad (2)$$

где  $b$  — вектор решения размерности  $n$ ;  $I$  — вектор правой части размерности  $m$ , а  $K$  — соответствующий ядру уравнения (1) матричный оператор размерности  $m \times n$ . Построить наилучшим образом такой оператор (иначе алгебраизировать уравнение (1)) можно лишь на основе анализа физических

особенностей решаемой задачи. Прежде всего следует учесть, что вектор  $\mathbf{I}$  имеет малую размерность (число каналов регистрации не превышает 7–10). Исходя из этого, в отличие от [2, 3], при алгебраизации уравнения (1) нами использовался подход, предложенный в [4] при решении ОЗ лазерного многочастотного зондирования атмосферы, суть которого состоит в следующем.

Выберем в области определения функции  $b(\xi)$  систему узлов  $\{\xi_l\}$ ,  $l = 1, 2, \dots, n$  и положим, что для каждого внутреннего подынтервала  $[\xi_l, \xi_{l+1}]$  функция  $b(\xi)$  описывается аналитически. При этом следует отметить, что данное предположение не касается особенностей поведения ядра уравнения (1) для всех  $[\xi_l, \xi_{l+1}]$ .

Для простоты изложения положим, что в отличие от [4], функция  $b(\xi)$  аппроксимируется не квадратичной параболой, а прямой линией, т. е.  $b(\xi) = a_l + d_{l+1}\xi$  для всех  $[\xi_l, \xi_{l+1}]$ .

В свою очередь, коэффициенты  $a_l$  и  $d_l$  определяются через значения  $b(\xi_l)$ . При этом, следуя [4], легко получить выражение для замены уравнения (1) соответствующей суммой

$$\int_0^1 K(v; \xi) b(\xi) d\xi = \sum_{l=1}^{n-1} \int_{\xi_l}^{\xi_{l+1}} K(v; \xi) [a_l + d_{l+1}\xi] d\xi = \sum_{l=1}^{n-1} Q_{l,l} b_l, \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, m, \quad l = 1, 2, \dots, n,$$

где  $K(v; \xi) = K(v; B[v, T(\xi)])$ , а коэффициенты квадратур —  $Q_{i,j}$  определяются через значения ядра уравнения и узлы сеток [4]. Интегралы в (3) могут быть вычислены с любой точностью, т. к. ядро уравнения определено для любых точек интервала  $[\xi_l, \xi_{l+1}]$ . Отметим, что при подобном подходе к алгебраизации исходного уравнения (1) можно уменьшить размерность матрицы оператора  $K$  в два–четыре раза (при сохранении требуемой погрешности квадратурной формулы (3)). Это, в свою очередь, приводит к значительному увеличению быстродействия алгоритма решения ОЗ, что особенно важно в системах оперативной обработки спутниковых данных.

Перейдем теперь к задаче построения алгоритма решения ОЗ. В [3, 4] при решении ОЗ ДТЗА использовался метод сглаживающего функционала Тихонова (СФТ), построение которого осуществлялось исходя из ограничения на степень гладкости искомого решения. При этом СФТ принимает вид

$$T_\alpha [b] = \|\hat{K}b - I\|_{L_2}^2 + \alpha \|b\|_{W_2}^2, \quad (4)$$

где  $\alpha$  — параметр регуляризации.

Однако в нашем случае СФТ следует строить исходя из наличия априорной информации о восстанавливаемом профиле  $b(\xi)$ . В простейшем случае такой информацией может служить некий модельный профиль  $b_M(\xi) = B[v, T_M(\xi)]$ , где  $T_M(\xi)$  — среднеклиматический профиль температуры. В случае комплексного ДТЗА таковым может быть температурный профиль, полученный по лидарным либо радозондовым данным, а построение СФТ можно осуществить исходя из ограничения на норму отклонения решения от модели. При этом СФТ принимает вид

$$T_\alpha [\Delta b] = \|\hat{K}(\Delta b) - \Delta I\|_{L_2}^2 + \alpha \|\Delta b\|_{W_2}^2, \quad (5)$$

где  $\Delta b = b - b_M$ , а  $\Delta I = I - I_M = 1 - Kb_M$ .

Отметим, что подобный подход применялся ранее одним из авторов при обработке данных лазерного зондирования атмосферного озона [5], а также авторами работ [3, 6] при решении ОЗ ДТЗА с использованием метода статистической регуляризации.

Остановимся далее на вопросе минимизации функционалов (4), (5). Известно [7], что данная задача может быть решена либо прямой минимизацией функционалов (4), (5), либо сведением данной задачи к решению уравнения Эйлера для СФТ. В данной статье использовался метод сопряженных градиентов (МСГ) при минимизации функционалов (4), (5). Его достоинствами являются гарантированная сходимость, простота реализации на ЭВМ и возможность создания различных модификаций в зависимости от наличия той или иной дополнительной информации о восстанавливаемом профиле  $T(\xi)$ . Таковой может служить информация о наличии и высоте термоинверсий, информация о возможной величине отклонения  $T(\xi)$  от  $T_M(\xi)$ . В последнем случае можно решать задачу минимизации функционалов (4), (5) с ограничениями в форме неравенств и т. д.

Для исследования эффективности предложенного подхода к решению ОЗ ДТЗА авторами была проведена серия численных экспериментов, на обсуждении результатов которых мы остановимся ниже.

## 2. Схема проведения численного эксперимента

В расчетах предполагалось, что измерения уходящего излучения осуществляются в 15-мкм полосе поглощения углекислого газа с помощью ИК-радиометра HIRS-II, входящего в состав штатной аппаратуры TOVS спутников серии NOAA (центральные частоты 669, 680, 690, 703, 716, 733  $\text{cm}^{-1}$ ).

В качестве моделей температуры использовались модельные профили  $T_{M1}$  (лето средних широт) и  $T_{M2}$  (тропическая модель), на которые накладывались возмущения  $\Delta T_{1,2}(\xi)$ . Таким образом,  $T_1(\xi) = T_{M1}(\xi) + \Delta T_1(\xi)$ ,  $T_2(\xi) = T_{M2}(\xi) + \Delta T_2(\xi)$ , а выбор  $\Delta T_1(\xi)$  и  $\Delta T_2(\xi)$  осуществлялся по данным [3]. Целью моделирования являлось исследование точностных характеристик и сравнительный анализ вычислительных схем (4) и (5), а также метода статрегуляризации. В случае использования в качестве априорной модели среднеклиматических профилей восстановление  $T_{1,2}(\xi)$  осуществлялось по 21 точке, и при этом в правую часть уравнения (1) с помощью датчика случайных чисел вносилась относительная погрешность порядка 1%, что соответствует реальным погрешностям регистрации интенсивности уходящей радиации  $I(\nu)$  радиометром HIRS-II.

Выбор параметра регуляризации осуществлялся по методу обобщенной невязки с последующими уточнением по квазиоптимальному критерию [7]. Что касается расчета функций пропускания атмосферы  $P[\nu, T(\xi)]$  и ядра уравнения (1), то они проводились по приближенным методикам, приведенным в [8]. При исследовании эффективности комплексного подхода к решению ОЗ ДТЗА (бортовой лидар + радиометр) восстановление профилей температуры осуществлялось по схеме (5), но при этом в качестве априорного профиля  $T_M(\xi)$  использовался профиль температуры, полученный по лидарным данным —  $T_L(\xi)$ . С этой целью проводилось численное моделирование эксперимента по ДТЗА с применением трехчастотного бортового лидара с энергетическими характеристиками, приведенными в [1]. Однако в отличие от [1] при восстановлении профиля температуры  $T_3(\xi)$  по методу разделения аэрозольных и молекулярных компонентов в принимаемых локационных сигналах нами применялись регуляризирующие алгоритмы обработки оптико-локационных данных.

Восстановление  $T_3(\xi)$  осуществлялось по 41 точке с разрешением 1 км по вертикали и 100 км по горизонтали и носило качественный характер, т. е. определялись лишь высота и знак отклонения истинного профиля температуры  $T_3(\xi)$  от среднеклиматического. Полученные таким образом значения  $\Delta T_3(\xi)$  и  $T_3(\xi)$  включались в математическую схему обработки данных, полученных с помощью радиометра HIRS-1I.

Подробное описание данного метода восстановления профиля температуры и оценка его эффективности выходит за рамки данной статьи и будет дано в следующей публикации.

Перейдем далее к описанию результатов численного моделирования.

### 3. Результаты численного моделирования

На рис. 1 приведены результаты восстановления модельного профиля температуры  $T_2(\xi)$ , полученные с использованием вычислительной схемы (4), а на рис. 2 для сравнения те же данные, но полученные по схеме (5).

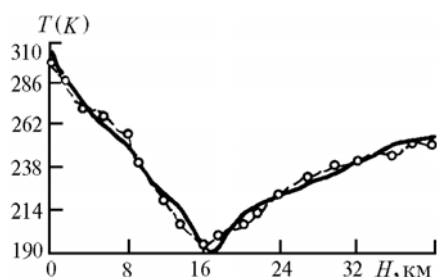


Рис. 1. Результаты численного эксперимента по восстановлению модельного профиля температуры: сплошная кривая — точные значения  $T_2(\xi) = T_{M2}(\xi) + \Delta T_2(\xi)$ ; с кружками — восстановленные по схеме (4) значения  $T_{2^*}(\xi)$

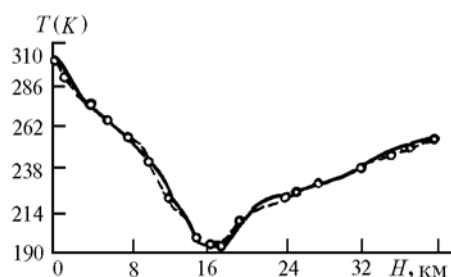


Рис. 2. Результаты численного эксперимента по восстановлению модельного профиля температуры: сплошная кривая — точные значения  $T_2(\xi) = T_{M2}(\xi) + \Delta T_2(\xi)$ ; кривая с кружками — восстановленные по схеме (5) значения  $T_{2^*}(\xi)$ , априорный профиль — среднеклиматический

При этом в качестве априорной модели использовался среднеклиматический профиль температуры  $T_{M2}(\xi)$ . На рис. 3 для большей наглядности приведены результаты восстановления  $\Delta T_3(\xi)$  по схеме (5) с использованием в качестве априорной модели и профиля температуры, восстановленного по лидарным данным, что в достаточной мере иллюстрирует эффективность комплексного подхода к решению ОЗ ДТЗА.

На рис. 4 и в таблице, по аналогии с [3], даны результаты оценок точностных характеристик восстановления  $T_{1,2}(\xi)$  в зависимости от схемы интерпретации данных ДТЗА. Здесь  $\Delta \bar{T} = \sum_{i=1}^n |T(\xi_i) - T_{\alpha}(\xi_i)| / n$  характеризует некоторое среднее отклонение восстановленного профиля  $T_{\alpha}(\xi)$  от истинного —  $T(\xi)$ , а  $\Delta T_{\max}$  — максимальное отклонение  $T_{\alpha}(\xi)$  от  $T(\xi)$ .

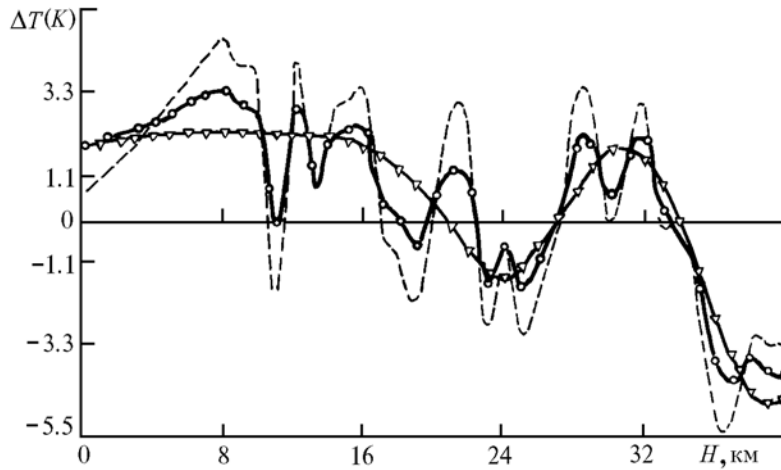


Рис. 3. Результаты численного эксперимента по комплексному дистанционному термическому зондированию атмосферы: штриховая кривая — точные значения  $\Delta T_3(\xi)$ ; кривая с кружками — восстановленные по схеме (5) значения  $T_{3^*}(\xi)$ , априорный профиль — лидарный; кривая с треугольниками — восстановленные по схеме (5) значения  $T_{3^*}(\xi)$ , априорный профиль — среднеклиматический

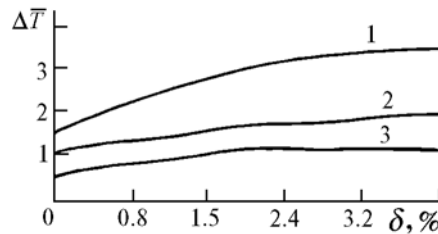


Рис. 4. Зависимость средней погрешности восстановления профилей температуры  $\Delta T$  от уровня погрешностей регистрации интенсивности уходящей радиации —  $\delta$ . 1 — восстановление по схеме (4) без привлечения априорной информации; 2 — восстановление по схеме (5), априорный профиль — среднеклиматический; 3 — восстановление по схеме (5), априорный профиль — лидарный

#### Сравнение методик интерпретаций

Метод восстановления	$\frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}}$	$T_1(\xi)$	$T_2(\xi)$
Схема (4) метод СФТ	$\Delta T$	2,2	3
	$\Delta T_{\max}$	4,0	4,2
Схема (5) метод СФТ с использованием априорной информации	$\Delta T$	1,2	1,1
	$\Delta T_{\max}$	2,3	2,2
Метод статрегуляризации при адекватной статистике	$\Delta T$	1,8	1
	$\Delta T_{\max}$	3,8	2,3
Метод статрегуляризации при неадекватной статистике	$\Delta T$	3,5	2,6
	$\Delta T_{\max}$	10	5,6

#### 4. Выводы и рекомендации

Простейший качественный анализ, выполненный на основе графической информации, представленной на рис. 1–3, позволяет сделать очевидный вывод о высокой эффективности алгоритма (5), по сравнению со стандартной схемой СФТ. В то же время, анализируя количественные оценки точностных характеристик восстановления профилей температуры —  $\Delta \bar{T}$  и  $\Delta T_{\max}$ , приведенные в таблице, можно сделать следующие выводы:

1. Метод статрегуляризации при наличии адекватной статистики предпочтительнее, нежели метод СФТ, т.к. ДГ, полученное по методу статрегуляризации, составляет 1–2 К, а  $\Delta\bar{T}$ , полученное по методу СФТ, лежит в пределах 2–3 К.

2. В случае неадекватной статистики метод СФТ оказывается эффективнее, т. к.  $\Delta\bar{T}$ , полученное с применением статрегуляризации, уже составляет величину 2,5–3,5 К, а значение  $\Delta T_{\max}$  может достигать 6–10 К.

Значения  $\Delta\bar{T}$ , полученные по схеме (5) и по методу статрегуляризации при наличии адекватной статистики, практически совпадают. В свою очередь, значения  $\Delta T_{\max}$ , полученные по схеме (5), значительно меньше, нежели значения  $\Delta T_{\max}$ , полученные по методу статрегуляризации при использовании неадекватной статистики.

При этом следует отметить, что схема (5) требует гораздо меньше априорной информации, нежели метод статрегуляризации, и более проста при своей реализации на ЭВМ. Помимо этого достоинством вычислительной схемы (5) при использовании ее для обработки данных на станциях регионального приема спутниковой информации является ее способность усваивать практически любую априорную информацию о восстанавливаемом профиле температуры. Это могут быть результаты радиозондирования, лидарные и содарные данные, и результаты контактных измерений, получаемые с бортов самолетов, наземных метеостанций и т.д. При этом априорные данные, в отличие от метода статрегуляризации, могут быть не обеспечены статистически и, более того, могут носить чисто качественный характер. Например, высота и знак термоинверсии, полученные с помощью содара, высота нижней границы и оптические характеристики облачности, полученные по лидарным данным и т.д.

И наконец, рис. 4 иллюстрирует точность восстановления профилей температуры в зависимости от уровня погрешностей регистрации уходящей радиации и схемы интерпретации. Графики на рис. 4 имеют ряд особенностей:

1) все кривые начинаются не из точки (0, 0), а из точек (0,  $\Delta\bar{T}_0$ ). Величина  $\Delta\bar{T}_0$  характеризует так называемый «нулевой шум» алгоритма. Очевидно, что применение вычислительной схемы (5) и квадратурных формул (3) позволило существенно уменьшить значение  $\Delta\bar{T}_0$ . Отметим, что как и в [3], кривая 1 на рис. 4 получена по схеме (4) с применением квадратурной формулы трапеции для неравностоящих узлов при алгебраизации уравнения (1);

2) выявляется относительно слабая зависимость  $\Delta\bar{T}_0$  от уровня погрешностей регистрации уходящего излучения;

3) совместная обработка данных активного (лидар) и пассивного зондирования (ИК-радиометр) позволяет существенно уменьшить «нулевой шум» алгоритма восстановления  $T(\xi)$  и значительно увеличить вертикальное разрешение пассивного метода ДТЗА, что следует из графиков, приведенных на рис. 3.

В заключение следует отметить, что предложенный подход к решению задачи комплексного ДТЗА позволяет проводить исследования в области планирования и проведения синхронных подспутниковых экспериментов, включать в обработку данных пассивного ДТЗА разнородные, полученные разными физическими методами и с различным разрешением, априорные данные о восстанавливаемом профиле температуры.

1. Russel Ph., Mc. Cormick M. P. //Appl. Opt. 1982. V. 21. № 9. С. 1554–1563.
2. Кондратьев К. Я., Тимофеев Ю. М. Термическое зондирование атмосферы со спутников. Л.: Гидрометеониздат, 1970. 410 с.
3. Кондратьев К. Я., Тимофеев Ю. М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеониздат. 1978. 280 с.
4. Наац И. Э. Теория многочастотного лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1980. 157 с.
5. Зуев В. Е., Иваненко Б. П., Наац И. Э. //Исследование Земли из космоса. 1985. №5. С. 119–121.
6. Покровский О. М., Тимофеев Ю. М. //Физика атмосферы и океана. 1971. Т. VII. № 1. С. 12–18.
7. Тихонов А. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 282 с.
8. Тимофеев Ю. М., Шпенкух Д. //Труды Международного симпозиума по спутниковой метеорологии. Л.: Гидрометеониздат, 1977. С. 29–33.

Томский госуниверситет им. В.В. Куйбышева

Поступила в редакцию  
8 января 1992 г.

**V. P. Ivanenko, K. I. Gobrussenko. A Complex Approach to Remote Thermal Sensing of the Atmosphere.**

A complex approach to solving the problem on remote thermal sounding of the atmosphere based on coprocessing of lidar (active) and radiometric (passive) sounding data from a satellite is proposed. Some methods of solving inverse problems of spaceborne IR-radiometry which allow us to adopt and use the information about the temperature profile sought that is obtained with spaceborne lidars. The efficiency of the algorithms is studied numerically.