

# ЗАДАЧА ЛИМБОВОГО СВЧ ЗОНДИРОВАНИЯ В НЕКОРРЕКТНОЙ ПОСТАНОВКЕ

Гайкович К.П., Черняева М.Б.  
Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ),  
Б. Печерская, 25, Нижний Новгород, 603600, Россия,  
телефон : (8312) 366751, факс : (8312) 369902,  
e-mail : gai@nirfi.nnov.su  
Нижегородский государственный университет (ННГУ),  
пр.Гагарина, 24, Нижний Новгород, 603600, Россия

*Аннотация* - Задача лимбового зондирования решается с учетом некорректности исходного уравнения на основе метода обобщенной невязки Тихонова. Такой подход позволяет обобщить постановку задачи для случаев, когда учитывается ширина диаграммы направленности антенны, когда тепловое излучение задано только на части интервала высот, в котором восстанавливается профиль концентрации газовой составляющей, или когда профиль восстанавливается по спектру теплового излучения, измеренному в фиксированном направлении.

## I. Введение

Задача лимбового зондирования - восстановление профилей концентрации газовых составляющих атмосферы по измерениям теплового излучения в их спектральных линиях на просвет (или проходящего через атмосферу излучения с другого спутника) в зависимости от высоты перигея луча исследуется с целью использования возможностей спутниковых измерений для решения проблемы глобального мониторинга атмосферы. Исследования соответствующей обратной задачи начались со слабой линии водяного пара на 1,35 см [1], где оказалось возможным свести задачу к интегральному уравнению типа Абеля и получить решение в виде его обратного преобразования.

Учет влияния поглощения в сильных спектральных линиях приводит к нелинейному интегральному уравнению со слабой особенностью с ядром, которое зависит от искомого профиля концентрации газовой компоненты. Для решения этой задачи был разработан эффективный итерационный метод численного решения, исследования которого показали, что по измерениям на частотах в спектральных линиях озона, водяного пара и окиси углерода оказывается возможным восстановить высотный профиль концентрации газовой компоненты [2]. На каждом шаге итерационного процесса соответствующее линеаризованное уравнение представляет собой уравнение Вольтерра 1-го рода, решение которого является, вообще говоря, некорректной задачей. Эта некорректность является слабой (аналогичной некорректности обратного преобразования Абеля в [1] - типа задачи вычисления производной по экспериментальным данным), и для уменьшения ее влияния использовалось сглаживание экспериментальных данных гладкой кривой до уровня ошибки измерений, используя аппроксимацию полиномами [1,2].

Если в [1,2] использование упрощенного подхода к регуляризации могло приводить лишь к некоторой потере точности, то в более общей постановке задачи, в частности, при учете конечной ширины луча диаграммы направленности, такой подход

становится невозможным. В этом случае соответствующее линеаризованное уравнение представляет собой уже интегральное уравнение с постоянными пределами интегрирования типа Фредгольма 1-го рода, которое является сильно некорректным. Постановки задачи, также приводящие к сильной некорректности, включает случаи, когда зависимость измеряемого излучения от высоты перигея луча известна лишь на части (или частях) интервала высот восстановления и (или), когда шаг измерений по высоте может быть много больше шага высотной дискретизации восстанавливаемого профиля.

Поскольку время, требуемое на процедуру сканирования, может существенно ограничивать точность измерений, интерес представляет постановка задачи восстановления профиля концентрации по спектру теплового излучения, измеряемому на фиксированном прицельном расстоянии. В этом случае сохраняются преимущество лимбового зондирования, связанное с отсутствием влияния излучения подстилающей поверхности, но задача также становится сильно некорректной, близкой к задаче восстановления профиля по наземным измерениям спектра теплового излучения в линии озона, рассмотренной в [3]. В [3] нелинейная обратная задача была успешно решена итерационным методом, аналогичным [2], но на каждом шаге итерационного процесса соответствующее линеаризованное уравнение, представлявшее собой уравнение Фредгольма 1-го рода, решалось методом обобщенной невязки Тихонова [4].

Естественным представлялось теперь вернуться к решению слабо некорректной лимбовой задаче в постановке [2], а также в указанных выше более общих постановках задачи на основе метода [3] с использованием строгой математической теории некорректных задач [4]. Численное моделирование было выполнено для лимбовых измерений теплового излучения озона в линии 142 ГГц.

## II. Результаты решения задачи

Решение обратной задачи лимбового зондирования в постановке [2] сводится к уравнению для яркостной температуры теплового излучения с переменным нижним пределом, которым является высота точки перигея луча (длина волны может изменяться в зависимости от этого параметра):

$$T_B(r_0, \lambda) = \int_{r_0}^{\infty} u(r)K(r, r_0, \lambda, u)dr, \quad (1)$$

где  $T_B(r_0, \lambda)$  - радиояркая температура в зависимости от высоты точки перигея луча и от длины волны  $\lambda$ ,  $u$  - концентрация газовой компоненты,  $K$ - нелинейное ядро.

Для решения задачи применялся итерационный метод [3]. Поскольку при решении некорректных задач ошибка восстановления не пропорциональна погрешности данных и может быть определена только путем численного моделирования, был выполнен соответствующий численный анализ. Этот анализ показал, что точность решения несколько возрастает по сравнению с [2], особенно для сложных распределений. Метод допускает обобщение задачи для случая, когда учитывается конечная ширина диаграммы направленности. Если форма диаграммы направленности в вертикальной плоскости (обынтегрированная по азимуту) описывается функцией  $\Phi(r-r_0)$ , то для измеряемой антенной температуры справедливо

$$T_A(r, \lambda) = \int_{r_s}^{\infty} \Phi(r-r_0)dr_0 \int_{r_0}^{\infty} u(r')K(r', r_0, \lambda, u)dr' \quad (2)$$

$r_s$  - радиус Земли. Меняя порядок интегрирования,

$$T_A(r, \lambda) = \int_{r_s}^{\infty} u(r')dr' \int_{r'}^{\infty} \Phi(r-r_0)K(r', r_0, \lambda, u)dr_0 \quad (3)$$

Внутренний интеграл в (3) образует новое ядро  $K'$  в уравнении для антенной температуры, которое уже является уравнением с постоянными пределами типа Фредгольма 1-го рода:

$$T_A(r, \lambda) = \int_{r_s}^{\infty} u(r')K'(r', r, \lambda, u)dr' \quad (4)$$

Если решать задачу (1) в более сложной постановке, полагая, что значения  $T_B(r_0)$  заданы только в интервале  $r_s < r < r_H$  (до высоты  $H$ ), то интервал восстановления разбивается на две физически существенно различные области. Во внутренней области  $r < r_H$  решение близко к уравнению типа Вольтерра 1-го рода в исходной постановке задачи в работе [2]. Во внешней области  $r > r_H$  задача приближается по типу к уравнениям Фредгольма 1-го рода со свойствами решения, аналогичными обратной задаче [3]. Уравнение (1) для внешней и внутренней области в целом также является некорректным, тип которого не имеет особого названия, сочетая в себе признаки обоих упомянутых уравнений, которые должны по-разному проявляться во внешней и внутренней области восстановления.

Для случая, когда профиль озона восстанавливается по спектру  $T_B(\lambda)$  на фиксированной прицельной высоте  $r_0$ , результаты аналогичны по точности задаче наземного зондирования [3].

Следует отметить, что для лимбового зондирования в целом существенной проблемой является привязка высоты, т.е. определение абсолютной высоты перигея луча.

### III. Заключение

Разработан метод решения обратной задачи лимбового зондирования профилей газовых составляющих атмосферы по измерениям теплового излучения с учетом принадлежности ее к классу некорректных задач. Помимо исходной постановки задачи [2] задача решена для ряда случаев в более общей постановке, приводящих к сильной некорректности решения. Алгоритмы решения некорректной задачи основаны на применении метода обобщенной невязки Тихонова [4]. Методом численного моделирования получены оценки точности решения для случая зондирования озона в его спектральной линии 142 ГГц.

### IV. Список литературы

- [1]. Гайкович К.П., Китай Ш.Д.. О возможности определения влагосодержания верхних слоев атмосферы радиометрическим методом // Исследование Земли из космоса, 1982, N 5, с.54-58.
- [2]. Гайкович К.П., Китай Ш.Д., Наумов А.П.. Об определении высотных распределений озона и других малых газовых составляющих атмосферы по лимбовым измерениям со спутника в СВЧ диапазоне // Исследование Земли из космоса, 1991, N 3, с.73-81.
- [3]. Gaikovich K.P. Tikhonov's method of the ground-based retrieval of the ozone profile // Digest of IGARSS'94, USA, Pasadena: California Institute Of Technology, 1994, v.1, pp.7-9.
- [4]. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г.. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М: Наука, 1983. 200 с.

### THE LIMB-VIEWING MICROWAVE SOUNDING AS AN INCORRECT PROBLEM

Gaikovich K.P., Tchernjaeva M.B.  
*Radiophysical Research Institute,*  
*B. Pecherskaja st., 25, Nizhny Novgorod, 603600,*  
*Russia.,*  
*phone : (8312) 366751, fax : (8312) 369902,*  
*e-mail : gai@nirfi.nnov.su*  
*Nizhny Novgorod State University*  
*Gagarina av., 24, Nizhny Novgorod, 603600,*  
*Russia.*

The limb-viewing inverse problem is solved taking into account the incorrect property of initial equation on the basis of Tikhonov's method of generalized mismatch. Such an approach gives the possibility to generalize the problem formulation for cases when antenna beam width is taken into account; when the thermal emission is given only for part of the region, in which the concentration of gaseous component is retrieved; or when the profile is retrieved by thermal emission spectrum measured in the fixed direction.