

УДК 551.5

**К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЯ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ АТМОСФЕРЫ В ПОЛОСЕ ПОГЛОЩЕНИЯ  $O_2$   $\lambda \sim 5$  мм**

*Н. Н. Маркина, М. И. Сумин*

Обсуждается влияние обычно используемой линеаризации (с применением статистически экстраполированного профиля температуры) интегрального уравнения радиотеплолокации в области  $\lambda \sim 5$  мм на точность восстановления высотных профилей температуры атмосферы при дистанционном зондировании с поверхности Земли. Показана высокая эффективность и достаточность для практических целей рассмотренной аппроксимации в широком диапазоне условий зондирования

Из проблем постановки и интерпретации задачи термического зондирования атмосферы в области спин-вращательной полосы поглощения  $O_2$   $\lambda \sim 5$  мм [1-9] менее освещенной в литературе была проблема влияния линеаризации исходного интегрального уравнения на точность решения соответствующей обратной задачи. Ошибки линеаризации оценивались в работах [2, 5], но внимание к этому вопросу было вновь привлечено после рассмотрения возможных коррекций к линеаризованному по методике [1] ядру интегрального уравнения радиотеплолокации на основе аппарата функциональных производных [10]. Суть проблемы линеаризации уравнения данной задачи состоит в следующем.

Исходное интегральное уравнение, являющееся решением уравнения переноса электромагнитной энергии [11], для случая наземного зондирования и в приближении плоскостной атмосферы без учета рефракции [12] имеет вид

$$T_{\gamma, \nu}(\theta) = \int_{p_{\min}}^{p_0} T(p)K[\gamma, \theta, T(p), p] dp \equiv T_{\gamma}[\gamma, \theta, T(p)], \quad (1)$$

где ядро уравнения

$$K[\gamma, \theta, T, p] \equiv \frac{10^{-2} \gamma_{\nu}(p, T)}{\cos \theta_{p\nu}(p, T) g} \exp \left[ - \int_p^{p_0} \frac{10^{-2} \gamma_{\nu}(p', T(p'))}{\cos \theta_{p\nu}(p', T(p')) g} dp' \right]. \quad (2)$$

В выражении (2) давление  $p$  выражено в мбар, коэффициент поглощения  $\gamma_{\nu}$  — в  $км^{-1}$ , плотность воздуха  $\rho_{\nu}$  — в  $г/м^3$ , температура  $T$  и яркостная температура  $T_{\gamma, \nu}(\theta)$  — в градусах К,  $\theta$  — зенитный угол.

Методы решения нелинейного интегрального уравнения 1-го рода (1) рассматривались в [1, 2, 5] (см. также обзор математических методов в монографиях [13-15]). В перечисленных работах уравнение (1) предварительно линеаризовывалось и к линеаризованному уравнению применялись соответствующие методы.

В работах [1, 6-9] линеаризованное уравнение для отклонений яркостной и кинетической температур от соответствующих средних значе-

ний, полученных с учетом статистической экстраполированного профиля температуры  $T^*(p)$ , имеет вид

$$\delta T_{\gamma, \nu}(\theta) = \int_{p_{\min}}^{p_0} \delta T(p) K[\nu, \theta, T^*(p), p] dp, \quad (3)$$

где

$$\delta T(p) = T(p) - T^*(p), \quad \delta T_{\gamma, \nu}(\theta) = T_{\gamma}[\nu, \theta, T(p)] - T_{\gamma}[\nu, \theta, T^*(p)],$$

$$T^*(p) = \bar{T}(p) + \frac{\text{cov}[T(p_0), T(p)]}{\text{cov}[T(p_0), T(p_0)]} [T(p_0) - \bar{T}(p_0)]. \quad (4)$$

Здесь среднесезонный температурный профиль  $\bar{T}(p)$  и ковариации  $\text{cov}[T(p_i), T(p_j)]$  вычисляются по результатам многолетнего аэрологического зондирования атмосферы, а величина  $T(p_0)$  (температура приземного слоя атмосферы) считается известной.

Уравнение (3) получается из (1) в случае пренебрежения интегралом

$$I_T = \int_{p_{\min}}^{p_0} T(p) \{K[\nu, \theta, T(p), p] - K[\nu, \theta, T^*(p), p]\} dp \quad (5)$$

по сравнению с ошибками радиометрических измерений  $T_{\gamma}$  (или  $\delta T_{\gamma}$ ). Уравнение (3) эквивалентно уравнению

$$T_{\gamma, \nu}(\theta) = \int_{p_{\min}}^{p_0} T(p) K[\nu, \theta, T^*(p), p] dp. \quad (6)$$

Линеаризация (3), (6) оказалась весьма эффективной, и при реализованных в настоящее время ошибках измерений яркостной температуры  $T_{\gamma, \nu}(\theta)$  в областях полосы  $\lambda \sim 5$  мм (наиболее предпочтительных для угломестного дистанционного зондирования атмосферы  $[7-9]$ ) написать «лучшее», чем (3), (6), линейное уравнение в смысле сочетания практической достаточности его решения (см. ниже) с простотой и удобствами процедуры линеаризации и ее реализации на ЭВМ, представляется затруднительным, и, по-видимому, нецелесообразным. Возможно именно по упомянутым причинам вопрос о погрешности линеаризации (1) рассматривался в литературе не полным образом.

Оценки среднеквадратичных значений  $I_T$ , выполненные по  $\sim 100$  результатам аэрологического зондирования в Центральной части ЕТ СССР для каждого из сезонов года (зима, лето) в длинноволновой области полосы  $O_2$   $\lambda \sim 5$  мм при зенитных наблюдениях, приведены в табл. 1. Для сравнения укажем, что среднеквадратичные ошибки радиометрических измерений атмосферного излучения в средней части полосы  $O_2$  ( $\nu \approx 53 \div 54$  ГГц) составляют, согласно  $[9, 16]$ :  $\delta T_p \approx 1,5$  К для  $\theta = 0^\circ$ ,  $\delta T_p \approx 1$  К для  $\theta \approx 60^\circ$  и  $\delta T_p \approx 0,5$  К для  $\theta > 60^\circ$ . На частотах с относительно малыми оптическими толщинами ( $\nu \approx 48 \div 52$  ГГц) значения  $I_T$  несколько возрастают при увеличении зенитного угла до  $\theta \approx 60 \div 70^\circ$  и уменьшаются при больших зенитных углах. В области  $\nu > 52,5$  ГГц значения  $I_T$  монотонно убывают при увеличении зенитных углов на-

Т а б л и ц а 1

Среднеквадратичные значения интегралов  $I_T$ ,  $K$  для ряда частот зондирования атмосферы с поверхности Земли в зенитном направлении ( $\theta = 0^\circ$ )

Сезон	$\nu, \text{ ГГц}$					
	51	52	52,5	53	53,5	54
Лето	0,69	0,50	0,41	0,40	0,39	0,20
Зима	1,1	0,82	0,54	0,42	0,30	0,19

значения  $I_T$  монотонно убывают при увеличении зенитных углов на-

блюдения и, например, на частоте  $\nu = 53,4$  ГГц среднеквадратичные значения  $I_T$  составляют уже около 0,1 К при  $\theta = 60^\circ$  и менее 0,1 К при  $\theta > 60^\circ$ . Т. е. в области  $\nu \approx 53 \div 54$  ГГц, для которой и решалась задача термического зондирования атмосферы [7-9, 16, 19], отношение среднеквадратичных значений  $I_T/\delta T_p$  для всех углов зондирования не превышает 0,2—0,3, и по этой причине решения уравнений (1), (6) следует считать неразличимыми между собой.

Для проверки данного утверждения нами было сопоставлено решение «идеального» линейного уравнения

$$\begin{aligned} \delta T_{\text{я}} - \int_{p_{\text{min}}}^{p_0} T(p) \{K[\nu, \theta, T(p), p] - K[\nu, \theta, T^{\circ}(p), p]\} dp = \\ = \int_{p_{\text{min}}}^{p_0} \delta T(p) K[\nu, \theta, T^{\circ}(p), p] dp, \end{aligned} \quad (7)$$

которое получается строго из (1) путем преобразований, аналогичных преобразованиям при выводе приближенного линейного уравнения (3). Линеаризация (7) достигалась подстановкой в левую часть зондовых значений температуры, которые принимались за «истинные» величины и относительно которых оценивались точности решения уравнений (3), (7) (а следовательно, и уравнений (1), (6)).

Решение уравнений (3), (7) осуществлялось, как и в [6-9], методом статистической регуляризации. В качестве решения в этом методе принимается вектор

$$\delta T = [K^*WK + (B_{TT}^{\circ})^{-1}]^{-1} K^* W \delta T_{\text{я}}, \quad (8)$$

где  $K$  — матрица, соответствующая ядру интегрального уравнения,  $W$  — матрица ошибок измерения,  $B_{TT}^{\circ}$  — модифицированная [1] ковариационная матрица температуры, с помощью которой осуществляется привязка решения к значению приземной температуры  $T(p_0)$ , \* означает транспонирование. Выражение (8) подчеркивает то обстоятельство, что точность решения обратной задачи дистанционного зондирования в существенной степени зависит от соотношения между точностями измерений яркостной температуры атмосферы и задания ядра исходного интегрального уравнения.

Численные эксперименты по решению задач (3), (7) проведены нами на частоте  $\nu = 53,4$  ГГц примерно для 100 результатов аэрологического зондирования атмосферы в каждом из сезонов года, при этом моделирование натурального эксперимента осуществлялось по схеме [9] с вышеуказанными значениями ошибок измерений  $\delta T_p(\theta)$ .

Анализ решений (3), (7) показал, что восстановленные значения  $\delta T$  действительно не различаются между собой в пределах точности их определения. Разница между значениями  $\delta T$  по (3) и (7) для большинства реализаций не превышает десятых долей градуса. Причина некоторых заметных ( $\sim 1$  К) расхождений, которые имеют место для отдельных зондов и некоторых уровней давления (например, при  $p = 700$  мбар), заключается в том, что ошибки определения  $\delta T$  в этих случаях имеют разные знаки для рассматриваемых задач (например,  $+0,55$  К и  $-0,45$  К и т. д., при этом по количеству случаев превышения ошибок в решениях  $\delta T$  и по их абсолютным значениям нельзя отдать предпочтение «идеальному» уравнению (1) по сравнению с приближенным уравнением (6)).

Среднеквадратичные ошибки  $\sigma_T^B$  дистанционного определения высотных профилей температуры на уровнях  $p \approx 1000 \div 400$  мбар для рассмотренной схемы эксперимента в аппроксимации (6) оценивались

в [17] (см. также табл. 2). Статистическое сравнение ошибок решения задач (3), (7) свидетельствует о том, что соответствующие величины  $\sigma_T^B$  различаются между собой менее чем на 0,1 К на уровнях  $p \approx \approx 1000 \div 500$  мбар, где восстановленные профили точнее статистически экстраполированных профилей  $T^B(p)$ , и разница в величинах  $\sigma_T^B$  достигает  $\sim 0,1$  К на уровне  $p=400$  мбар, где восстановленные профили уже близки к профилям  $T^B(p)$ .

Полученные результаты подтверждают вывод о неразличимости (при принятых ошибках измерений  $\delta T_p$ ) решений уравнений (3), (7) и свидетельствуют об эффективности и практической достаточности аппроксимации (6) при линеаризации исходного интегрального уравнения (1) в широком диапазоне условий зондирования. Для решения задачи радиотеплолокационного зондирования на частотах  $\nu < < 52,5$  ГГц, где погрешность линеаризации  $I_T$  уже не всегда достаточно мала, в принципе также можно пользоваться соотношением (3) для получения первого приближения к решению с последующей итерацией результатов.

Заметим, что для определения профиля удельной влажности  $q(p)$  из основного уравнения (1) в резонансных областях  $H_2O$  линеаризация вида (3) уже не всегда является эффективной (как при определении температуры), так как величина  $I_q$  (соответствующая  $I_T$ ) оказывается в некоторых случаях достаточно большой по сравнению с ошибкой измерений. Более подробно этот вопрос рассматривается в [20].

В заключение еще раз подчеркнем, что величины вариаций яркостных температур атмосферы, обусловленных вариациями кинетической температуры [6, 7], вместе с количественными значениями уровней формирования атмосферного излучения [9, 16, 18] свидетельствуют о предпочтительности постановки задачи радиотеплолокационного зондирования атмосферы с поверхности Земли для определения профилей  $T(p)$  в области  $\nu \approx 53 \div 54,5$  ГГц [3, 4, 6, 7, 9, 16]. Это утверждение находится в хорошем согласии с результатами экспериментальных исследований [8, 9, 17, 19].

Авторы выражают благодарность А. П. Наумову за обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Westwater E. R., Strand O. N. — J. Atm. Sci., 1968, 25, № 5, p. 750.  
 2. Westwater E. R., Ground-based determination of temperature profiles by microwaves, Thesis of Dissertation, University of Colorado, USA, 1970.  
 3. Westwater E. R. — Monthly Weather Rev., 1972, 100, № 1, p. 15.  
 4. Westwater E. R., Snider J. B. — J. Appl. Meteorology, 1975, 14, № 4, p. 524.  
 5. Miner G. F., Thornton D. D., Welch W. J. — J. Geophys. Res., 1972, 77, № 6, p. 975.  
 6. Ершов А. Т., Наумов А. П. — Изв. вузов — Радиофизика, 1974, 17, № 11, с. 1610.  
 7. Ершов А. Т., Лебский Ю. В., Наумов А. П., Плечков В. М. — Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана, 1975, 11, № 12, с. 1220.  
 8. Алешин В. И., Наумов А. П., Плечков В. М., Сумин М. И., Троицкий А. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 2, с. 198.  
 9. Сумин М. И., Троицкий А. В. — Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана, 1978, 13, № 10, с. 1090.

Таблица 2

Среднеквадратичные значения ошибок восстановления  $\sigma_T^B$ , К высотных профилей температуры атмосферы на ряде уровней давления  $p$  по наземным радиотеплолокационным данным согласно [17]

Сезон	$p$ , мбар				
	950	880	700	500	400
Лето	0,3	0,7	1,5	1,8	2,5
Зима	1,1	1,4	1,7	2,4	2,9

306

- 10 Жевакин С. А. — Изв вузов — Радиофизика (в печати)
- 11 Жевакин С. А., Троицкий В. С., Цейтлин Н. М. — Изв вузов — Радиофизика, 1958, 1, № 2, с. 19.
12. Гайкович К. П., Наумов А. П. — Радиотехника и электроника, 1979, 24, № 1, с. 168.
13. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1974.
14. Кондратьев К. Я., Тимофеев Ю. М. Термическое зондирование атмосферы со спутников. — Л.: Гидрометеиздат, 1970.
15. Малкевич М. С. Оптические исследования атмосферы со спутников — М.: Наука, 1973.
16. Троицкий А. В. — В сб. Радиофизические исследования атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1977, с. 105.
17. Наумов А. П., Sumin M. I., Troitsky A. V. — Proc. 5-th USSR — Japan Electronics Symposium, ed Tokai University, Japan, 1979, p. 59.
18. Наумов А. П. — Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана, 1973, 9, № 7, с. 699.
19. Кузнецова М. Г., Рассадовский В. А., Троицкий А. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1979, 22, № 8, с. 938.
- 20 Маркина Н. Н., Наумов А. П., Сумин М. И. — Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана (в печати).

Научно-исследовательский  
радиофизический институт

Поступила в редакцию  
11 апреля 1980 г.

TO THE PROBLEM OF THE TEMPERATURE PROFILE DEFINITION  
AT THE REMOTE ATMOSPHERE SOUNDING IN THE ABSORPTION BAND  
 $O_2 \lambda \sim 5 \text{ mm}$

*N. N. Markina, M. I. Sumin*

An effect is discussed of an ordinary linearization (with the use of statistically extrapolized temperature profile) of an integral equation of radio heat location in the region  $\lambda \sim 5 \text{ mm}$  on the accuracy of atmosphere height temperature profile restoration at a remote sounding from the Earth surface. A high efficiency and sufficiency is shown for practical purposes of the approximation considered in a wide range of sounding conditions.

---