

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Научный совет по комплексной проблеме
"Распространение радиоволн"

Ордена Трудового Красного Знамени Институт радиотехники и
электроники

Научно-учебный центр радиофизики, радиоастрономии и техники
миллиметровых волн

Институт физики АН Киргизской ССР

II ВСЕСОЮЗНАЯ
ШКОЛА - СИМПОЗИУМ
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ
МИЛЛИМЕТРОВЫХ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ
ВОЛН В АТМОСФЕРЕ

Тезисы лекций и докладов
Под редакцией д.т.н., профессора А.В.Соколова

Издательство "Илим"
Фрунзе 1986г.

О ПАССИВНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ В
МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

К.П.Гайкович, М.И.Сумин

Необходимость решения большого числа прикладных задач физики атмосферы, метеорологии и распространения радиоволн обусловила быстрое развитие дистанционных методов исследования атмосферы, в частности, методов, основанных на радиометрических измерениях теплового излучения в линиях поглощения атмосферных газов. Основное внимание уделялось определению высотных профилей температуры $T(h)$ по измерениям яркосных температур (T_r) в линиях O_2 вблизи $\lambda = 5$ мкм и профилей влажности $q(h)$ по измерениям в линиях 1,64 и 13,5 мм. Профили

$$T_r(\theta, \lambda) = \int_0^l T(\ell) \gamma(\ell, \theta, \lambda) e^{-\int_0^{\ell} \gamma(\ell') d\ell'} d\ell, \quad (I)$$

θ - угол места, l - путь луча, γ - коэффициент поглощения. Для угломестной или частотной схем зондирования уравнение (I) после линеаризации сводится к интегральному уравнению Фредгольма 1-го рода. Как правило, (по крайней мере, во всех существующих наземных комплексах дистанционного зондирования /1-3/) для решения этого уравнения использовались статистические методы в форме метода статистической регуляризации или регрессионных алгоритмов, основанных на использовании априорной информации, предоставляемой статистикой зондовых метеоданных (известно, что решение (I) без привлечения достаточной априорной информации невозможно из-за некорректности этой задачи). Точность восстановления оценивалась путем сопоставления результатов восстановления с данными аэрологического зондирования, а эффективность решения проверялась на основе сопоставления среднеквадратичных погрешностей восстановления с естественными вариациями метеозлементов T с точностью статистических оценок профилей по их приземным значениям. К настоящему времени независимые группы исследователей в разных странах пришли к согласующимся результатам в оценке возможных точностей восстановления метеопараметров /1-4/. Из этих результатов следует, что точность восстановления уступает точности аэрологического зондирования, убывая с ростом высоты. Имеет место загла-

живание гонкой структуры профилей. Однако для многих приложений достаточно и достигнутого уровня точности, особенно в тех случаях, когда требуется оперативное и непрерывное получение данных /4/.

Описанный выше подход, существенно опирающийся на данные стандартного аэрологического зондирования, полностью оставил вне сферы исследования вопросы, связанные с зондированием пограничного слоя атмосферы (десятки и сотни метров), поскольку, как правило, уже вторая точка зондовых метеоданных приходится на высоту 100 м + 250 м. Статистические методы оказываются неприемлемыми для решения этой задачи как по причине отсутствия соответствующих данных, так и в связи с большой изменчивостью и разнообразием пограничного слоя, которые затрудняют выделение более или менее универсальных ансамблей.

Следует отметить, что именно изменчивость пограничного слоя, наличие в нём весьма резких градиентов метеопараметров делают задачу дистанционного зондирования этого слоя особенно актуальной для ряда приложений, особенно для задач, связанных с прогнозом распространения радиоволн.

Методической основой постановки и решения задач дистанционного зондирования пограничного слоя является наиболее последовательный подход к решению некорректных обратных задач, развитый советской математической школой во главе с А.Н.Тихоновым /5/. Этот подход связан с использованием априорной информации о таких свойствах точного решения, как монотонность, ограниченность, выпуклость, гладкость и т.п. Конкурентноспособность такого подхода по сравнению со статистическими методами была показана нами, например, в /6/. Опыт разработки алгоритмов убедил, что успех решения обеспечивается только привлечением достаточно полной априорной информации о свойствах точного решения, которая выражается математически в ограничениях на величину и градиент искомой функции, в преобразовании уравнения к виду, в котором существенные изменения профиля даст определяющий вклад в изменения правой части и т.п. Особо отметим, что механическое применение общих математических алгоритмов, как правило, не приводит к удовлетворительным результатам при решении конкретных задач. Это вызвано тем, что такие алгоритмы и не предназначены для учёта одновременно всех видов специфической априорной информации в конкретной фи-

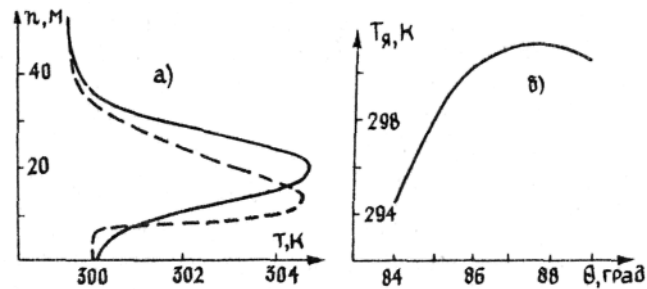
зической ситуации. Нетривиальность учёта такой специфики и определила, на наш взгляд, существующую ситуацию, когда предпочтение отдавалось статистическим методам решения.

В данной работе представлены первые результаты исследования возможностей восстановления профиля температуры в пограничном слое по измерениям $T_{\text{я}}$ в линии O_2 вблизи $\lambda = 5$ мм. Постановка задачи для пограничного слоя имеет свою специфику. Прежде всего, принимаемое излучение должно формироваться именно в этом слое, для чего необходимо использовать частоты не на склоне линии поглощения, как для зондирования всей атмосферы, а вблизи резонанса (60 ГГц). Диапазон изменений $T_{\text{я}}$ в данном случае значительно сужается и составляет не более нескольких градусов. Правильный подход к решению задачи состоит, по-видимому, в том, чтобы искать решение для пограничного слоя как составную часть решения для всей атмосферы с использованием измерений и на склоне линии. Здесь мы для простоты и выяснения принципиальных возможностей метода считаем, что вклад в излучение более высоких слоев атмосферы нам известен с достаточной точностью.

Для конкретного анализа мы выбрали модельный профиль с очень резкой инверсией температуры на высоте 20 м, представленный на рисунке. Для этого случая выполнен анализ информативного диапазона углов и частот измерений. Оказалось, что измерения отражают изменения температурного профиля лишь на частотах, близких к резонансу, и, кроме того, на углах места ниже 10° . При постановке обратной задачи одним из важнейших требований является линейность интегрального уравнения (I). Уравнение можно считать линейным, если вариации правой части, обусловленные вариациями температуры в ядре уравнения малы по сравнению с погрешностью измерений. В численных экспериментах установлено, что это требование ограничивает возможный диапазон частот и углов измерений.

Для решения обратной задачи был разработан алгоритм, основанный на методе регуляризации в форме принципа обобщённой невязки [5], с использованием априорной информации о гладкости в ограниченности снизу точного решения. Для угломестной и частотной схем зондирования, а также для различных вариантов выбора интервалов частот и углов измерений выполнено численное моделирование восстановления профиля по расчётным значениям $T_{\text{я}}$, на которые набрасывалась случайная погрешность. Лучшие результаты были полу-

чены для угломестной схемы измерений на частоте 58,5 ГШ в интервале углов места 1-5°. Для моделируемой погрешности измерений со стандартным отклонением $\delta T_{я} = 0,2$ К результаты восстановления представлены на рисунке.



На рисунке: а) сплошная кривая - исходный профиль; пунктир - восстановление по "измерениям" $T_{я}(\theta)$ с погрешностью $\delta T_{я}$; б) зависимость $T_{я}(\theta)$.

Близость восстановленной инверсии по форме, амплитуде и высоте максимума к исходному профилю показывает эффективность разработанного метода и перспективность дальнейших теоретических и экспериментальных исследований по радиометрическому зондированию пограничного слоя в ММ диапазоне.

Л и т е р а т у р а

1. Westwater R., Zhenhui W., Grody N.C., McMillin L.M. - J. Atm. and Oceanic Technology, 1985, v.2, N 2, p.97.
2. Askne J., Skoog G., Winber E. - Int. J. Remote Sensing, 1985, T.6, N 7, p.1241.
3. Gaikovich K.P., Markina N.N., Naumov A.P., Plechkov V.M., Sumin M.I. - Int. J. Remote Sensing, 1983, тт.4, н 2, p.419.
4. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач М.: Наука, 1979.
5. Василенко Н.А., Гайкович К.П., Сумин М.И. - Препринт НИИШ № 200, Горький, 1985.