

Академия наук СССР
Научный совет по комплексной проблеме
"Распространение радиоволн"
институт радиотехники и электроники
Государственный комитет РСФСР по делам науки и высшей школы
Научно-исследовательский радиофизический институт

IV ВСЕСОЮЗНАЯ ШКОЛА ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ
МИЛЛИМЕТРОВЫХ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ

Нижний Новгород, 3-10 сентября 1991 г.

Т Е З И С Ы Д О К Л А Д О В



Нижний Новгород

УДК 621.371.029.65

IV ВСЕСОЮЗНАЯ ШКОЛА ПО РАСПРОСТРАНЕННЫМ МИЛЛИМЕТРОВЫМ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫМ ВОЛНАМ, Нижний Новгород, 3-10 сентября 1991 г.: Тезисы докладов/АН СССР и др.; Редкол.: Н.А.Арманд (отв.ред.) и др. - Нижний Новгород: Научно-исследовательский радиофизический институт, 1991. - 273 с.

Представлены тезисы лекций и докладов по вопросам ослабления, рассеяния и рефракции миллиметровых радиоволн в атмосфере, рассеяния и излучения радиоволн подстилающими поверхностями жидкими объектами, дистанционного определения параметров атмосферы, флуктуации при распространении радиоволн, разработки аппаратуры и применения миллиметровых и субмиллиметровых волн и т.д.

Ч

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

доктор техн. наук Н.А.Арманд (ответственный редактор),
доктор физ.-мат. наук А.П.Наумов,
доктор технических наук А.В.Соколов,
канд. физ.-мат. наук Ш.Д.Китай (ответственный секретарь)

Сборник тезисов и докладов выпущен по оригиналам-макетам, присланным участниками школы, преимущественно без перепечатывания и редакторской правки

© Научно-исследовательский
радиофизический институт,
1991

К.П.Гайкович

Научно-исследовательский радиофизический институт,
Нижний Новгород

ВВЕДЕНИЕ В лекции рассматриваются возможности определения параметров атмосферы по измерениям рефракции проходящего излучения - обратные задачи рефракции. Специфику конкретных задач определяет взаимное положение и движение источника, приемника и атмосферы, а также диапазон частот излучения. В большинстве случаев достаточно хорошо выполняется приближение сферически-симметричной атмосферы для которой распределение показателя преломления представляется высотным профилем $n(h)$. Наблюдаемой величиной является угол рефракции в зависимости от угла места прихода луча $\varepsilon(\theta_0)$. Будем рассматривать астрономическую рефракцию, поскольку для любого источника вне атмосферы рефракцию можно пересчитать к рефракции эквивалентного бесконечно удаленного источника. Можно выделить четыре основных вида геометрии измерений, каждому из которых соответствуют различные уравнения для решения обратной задачи: лимбовые (затменные) измерения, измерения с некоторой высоты внутри атмосферы, измерения с поверхности и измерения при изменении положения источника или приемника внутри атмосферы.

Радиозатменные измерения были использованы для исследования атмосферы планет Солнечной системы с помощью радиопросвечивания сигналами, излучаемыми с космических аппаратов /1-2/. В дальнейшем были выполнены лимбовые измерения оптической рефракции космических источников на станции Салют-6 /3/, положившие начало исследованиям земной атмосферы рефрактометрическими методами. В этом случае угол рефракции можно выразить как

$$n(p) = \exp \left[\frac{1}{\pi} \int_p^\infty \varepsilon(p_0) \frac{dp_0}{\sqrt{p_0^2 - p^2}} \right], \quad r = \frac{p}{n(p)} \cos \theta_0, \quad (1)$$

и уравнение типа Абеля (1) имеет точное решение

$$n(p) = \exp \left[\frac{1}{\pi} \int_{p_0}^\infty \varepsilon(p_0) \frac{dp_0}{\sqrt{p_0^2 - p^2}} \right], \quad r = \frac{p}{n(p)}, \quad (2)$$

r - геоцентрическое расстояние, p_0 - перигей луча, r_H - радиус

орбиты ИСЗ. Методы лимбового зондирования принесли основной объем информации об атмосферах планет, новые данные о термической структуре тропосферы и стратосферы Земли, что стимулировало интерес к развитию методов наземного зондирования.

I. ВНУТРИАТМОСФЕРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ С ПРИПОДНЯТЫХ ПЛАТФОРМ

Если приемник расположен на некоторой высоте H внутри атмосферы, то угол рефракции при положительных углах места

$$\varepsilon_+ = -p_0 \int_{r_0}^{\infty} \frac{d \ln n}{dr} \frac{dr}{\sqrt{(nr)^2 - p_0^2}}, \quad p_0 = r_n n_n \cos \theta_0 = n_0 r_0, \quad (3)$$

а при отрицательных углах

$$\varepsilon_- = -2p_0 \int_{r_n}^{\infty} \frac{d \ln n}{dr} \frac{dr}{\sqrt{(nr)^2 - p_0^2}} - p_0 \int_{r_n}^{\infty} \frac{d \ln n}{dr} \frac{dr}{\sqrt{(nr)^2 - p_n^2}} \quad (5)$$

Задача в такой постановке рассмотрена в /4/. Выделяя вклад 1-го слагаемого в (4), который определяет рефракцию при прохождении луча в слое ниже уровня наблюдателя

$$\varepsilon_-(p_0) - \varepsilon_+(p_0) = -2p_0 \int_{p_0}^{p_n} \frac{d \ln n}{dp} \frac{dp}{\sqrt{p^2 - p_0^2}}, \quad p = nr,$$

получаем уравнение, решаемое с помощью обратного преобразования Абеля, которое является обобщением (1) для случая внутриатмосферных наблюдений. При этом профиль $n(r)$ в интервале высот ниже уровня наблюдателя r_n определяется

$$n(p) = n_n \exp \left[\frac{1}{\pi} \int_0^{p_n} (\varepsilon_-(p_0) - \varepsilon_+(p_0)) \frac{dp}{\sqrt{p_0^2 - p^2}} \right], \quad r = \frac{p}{n}. \quad (6)$$

вклад в рефракцию слоя в интервале $r < r_n$ становится заметным уже при высоте наблюдателя в несколько метров, что позволяет восстанавливать структуру $n(r)$ пограничного слоя атмосферы с приподнятых платформ (возвышенности, вышки, самолета).

Показатель преломления определяется значениями метеопараметров. В оптическом диапазоне

$$N^{op} = K_1^{op}(\lambda) \frac{p}{T} + K_2^{op} \frac{E}{T}, \quad (7)$$

$N = 10^6(n - 1)$ - индекс рефракции, P - давление, T - температура, E - парциальное давление водяного пара, $K_1^{op}(\lambda)$ - постоянная слабо зависящая от длины волны (значения K_1 , K_2 приве-

дены в /5/. По восстановленному высотному профилю $N(h)$ опреде-

ляются профили

$$\rho(h) = \int_h^{\infty} \frac{Mg(h')}{R_0 K_1^{\text{оп}}} N^{\text{оп}}(h') dh', \quad (8)$$

$$T(h) = (K_1^{\text{оп}} \rho(h) + K_2^{\text{оп}} E(h)) / N(h), \quad (9)$$

[4 - молекулярный вес воздуха, R_0 - газовая постоянная, g - ускорение свободного падения. Влажность достаточно учитывать с помощью модельного профиля. В радиодиапазоне

$$N^P = K_1^P \frac{P}{T} + K_2^P \frac{E}{T} + K_3^P \frac{E}{T^2} \quad (10)$$

и весомый вклад 3-го слагаемого в (10) позволяет по профилю $N^P(h)$ определять профиль $E(h)$ /6/ (значения K_1^P, K_2^P см. в/5/). Численные эксперименты /4/ показали, что при высоте наблюдения в десятки и сотни метров точность определения профилей N, T, P очень высока и ограничивается лишь степенью выполнения условия сферической симметрии поля показателя преломления. При реализации метода с высоты 20 м (возвышенность) и 289 м (метеомачта) достигнута точность восстановления температуры $\delta T \approx 0,1 \text{ К}$ /7-8/. Возможно восстановление по одной фотографии Солнца, касающегося горизонта /4/.

2. ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА РЕФРАКЦИИ ДЛЯ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ПОЛСКИТЕЛЬНЫХ УГЛАХ МЕСТА

Задача восстановления $n(h)$ в интервале высот выше уровня наблюдателя сводится к решению уравнения (3), что впервые было отмечено еще в /9/, однако задача считалась практически неразрешимой, т.к. было известно, что рефракция чувствительна к вариациям профиля $n(h)$ лишь на весьма малых углах места (так называемая "теорема Лапласа-Ариани"). В /4/ было показано, что

$$\int_p^{\infty} N(p) \frac{p p_0}{(p^2 - p_0^2)^{3/2}} dp \approx \tilde{\epsilon}(p_0), \quad \tilde{\epsilon} = -10^6 \epsilon + N(p_0) \cos \theta_0, \quad p_0 = p_0 \cos \theta_0, \quad \text{II}$$

p_0 - приземное значение. Эффективность решения некорректной задачи (11) могла быть установлена только на основе численного эксперимента, т.к. точность (и сама возможность) восстановления зависит от метода решения, т.е. от вида используемой априорной ин-

формации. Без использования такой информации решение (11) невозможно. Точность решения зависит от сложности восстанавливаемой функции и уменьшается не пропорционально уменьшению ошибки правой части, а гораздо медленнее.

Задача исследовалась на основе теории Тихонова с применением минимизации невязки на компактном классе монотонно убывающих функций /10-12/, методом обобщенной невязки /13/, методом статистической регуляризации с применением межуровневой ковариационной матрицы B_{NN} /10-12/. Последний метод оказался наиболее эффективным. Решение определяет средний по апостериорному распределению вектор:

$$N = \langle N \rangle + (K^*W^{-1}K + B_{NN}^{-1})K^*W^{-1}(\tilde{\mathcal{E}} - \langle \tilde{\mathcal{E}} \rangle), \quad (12)$$

K - матрица ядра (11), W - ковариационная матрица погрешностей, $\langle \cdot \rangle$ - усреднение по ансамблю. В /10-12/ получено, что профиль $N(h)$ восстанавливается при измерениях оптической рефракции с типичным уровнем погрешности $\delta\varepsilon \approx 5''$ с точностью $1+2 N$ -ед. Профили T из (9) и из (8) восстанавливаются с ошибками соответственно $1+3 K$ и $1+2$ мбар до высоты ~ 8 км, что существенно лучше оптимальной экстраполяции по приземному значению. В /11-12/ выполнено восстановление профилей $N(h)$, $T(h)$, $P(h)$ по измерениям рефракции звезд, подтвердившее полученные оценки. В радиодиапазоне профиль $N(h)$ - более сложная функция из-за влияния влажности, поэтому и погрешности восстановления при одинаковых значениях $\delta\varepsilon$ больше и составляют $\delta N \approx 4 N$ -ед.

В /10/ был установлен информативный диапазон углов измерения рефракции $\theta_0 < 4^\circ$. На более высоких углах вариации рефракции при фиксированном приземном значении N_0 составляют менее $1''$.

Следует отметить, что при наличии волноводной стратификации

рефракцию в виде

$$\varepsilon(p_\theta) = 10^{-6} \int_0^{N_0} \frac{dN}{\sqrt{(P(N)/P_\theta)^2 - 1}} \quad (13)$$

и функционал $\varepsilon(P(N))$ при $\delta p(N) \ll P(N)$ в виде

$$\varepsilon(P(N)) \approx \varepsilon^0(P^0(N)) + \frac{\delta\varepsilon}{\delta p} \delta p(N),$$

имеем

$$\varepsilon - \varepsilon^0 = \Delta\varepsilon(\rho_\theta) = 10^{-6} \int_0^{N_0} \delta\rho(N) \frac{\rho^0(N) \rho_\theta}{(\rho^0(N)^2 - \rho_\theta^2)^{3/2}} dN, \quad (14)$$

t.e. задача обнаружения волновода сводится к задаче обнаружения максимума функции $\rho(N)$ из уравнения, аналогичного (11).

3. МЕТОД ПОГРУЖЕНИЯ

В случаях, когда наблюдения проводятся при погружении источника или приемника в атмосферу, задача сводится к уравнению типа Вольтерра. В наиболее простом случае погружения приемника задача описывается уравнением Вольтерра 2-го рода:

$$N(\rho_h) - \int_{\rho_h}^{\infty} N(\rho) \frac{\rho \rho_h \sin \theta_0(\rho_h)}{(\rho^2 - \rho_h^2 \cos^2 \theta_0(\rho_h))^{3/2}} d\rho = 10^6 \operatorname{tg} \theta_0(\rho_h) \varepsilon(\rho_h), \quad (15)$$

где зависимость $\theta_0(\rho_h)$ определяет траектория погружения. Перспективы применения метода могут быть связаны с исследованием атмосфер планет при помощи спускаемых аппаратов.

Завершая рассмотрение рефрактометрических методов, отметим перспективность исследований, особенно в радиодиапазоне и в ситуациях, когда существенны горизонтальные неоднородности (см., например, /14/).

1. Kliore A.J., Gain D.L., Levy G.S., Eshleman V.R. The Mariner4 occultation experiment//Astronaut and Aeronaut.- 1965.-N7.- p72
2. Колосов М.А., Яковлев О.И., Круглов Д.М. и др. О радиопросвечивании Марса при помощи аппарата Марс-2//Радиотехника и электроника. - 1972. - Т.17, N 12. - С.2483-2490.
3. Гурвич А.С., Кан В., Попов Л.И. и др. Восстановление профиля температуры атмосферы по киносъёмкам Солнца и Луны с орбитальной станции Салют-6//Изв.АН СССР. Физика атмосферы и океана. - 1982.-- Т.18, N 1. - С.3-7.
4. Гайкович К.П., Гурвич А.С., Наумов А.П. О восстановлении метеопараметров из внутриатмосферных измерений оптической рефракции космических источников//Изв.АН СССР. Физика атмосферы и океана. - 1983. - Т.19, N 7 - С.675-682.
5. Колосов М.А., Шабельников А.В. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса. - М.: Сов. радио, 1976.

6. Гайкович К.П. Возможность определения метеопараметров атмосферы по радио- и радиооптическим измерениям рефракции космических источников/Дав, АН СССР. Физика атмосферы и океана. -1984. - Т.20, N 8. - С.675-682.
7. Загоруйко С.В., Кан В. Восстановление вертикального профиля температуры по измерениям рефракции с поверхности Земли. - В кн.: Труды 4 Всесоюзн. совещания по радиометеорологии. - Л.: Гидрометеиздат, 1984.
8. Бесчастнов С.П., Гречко Г.М., Гурвич А.С. и др. Структура температурного поля по наблюдениям рефракции с высотной метеорологической мачты/Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. - 1984. - Т.20, № 4. - С.231.
9. Павельев А.Г. Анализ решения обратной задачи рефракции// Радиотехника и электроника. - 1980. - Т.25, № 12. - С.2504-2509.
10. Гайкович К.П., Сумин М.И. О восстановлении высотных профилей показателя преломления, давления и температуры атмосферы по наблюдениям астрономической рефракции//Изв.АН СССР. Физика атмосферы и океана. - 1986. - Т.22, № 9. - С.917-924.
11. Василенко Н.А., Гайкович К.П., Сумин М.И. Определение профилей температуры и давления атмосферы по измерениям оптической рефракции вблизи горизонта// Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. - 1986. - Т.22, N 10. - С.1026-1033.
12. Василенко Н.А., Гайкович К.П., Сумин М.И. Метод определения профилей температуры атмосферы по наблюдениям астрономической рефракции звезд//ДАН СССР. - 1986. - Т.290, № 6. -С.1332-1335.
13. Арманд Н.А., Андрианов В.А., Смирнов В.М. Восстановление профиля коэффициента преломления атмосферы по измерениям частоты сигналов искусственного спутника Земли//Радиотехника и электроника. - 1987. - Т.32, N 4. - С.673-686.
14. Гайкович К.П. О восстановлении высотного профиля горизонтального градиента показателя преломления атмосферы из наземных измерений рефракции//Тезисы докладов 15 Всесоюзн. конференции по распространению радиоволн. - М.: Наука, 1987. - С.292.