

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

УДК 525.73

К.П. Гайкович, Г.Ю. Хачева

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА РЕФРАКЦИИ В ГЕОМЕТРИИ ПОГРУЖЕНИЯ

Рассматривается обратная задача рефракции для случая погружения источника или приемника в атмосферу, которая сводится к решению интегрального уравнения Вольтерры 2-го рода. Путем численного моделирования на основе ансамбля аэрозондовой статистики исследована зависимость точности решения от уровня погрешности измерения рефракции и угла наблюдения.

1. Введение

В ряде работ [1–3] измерения рефракции излучения в атмосфере использовались для восстановления высотного распределения показателя преломления и связанных с ним параметров, в частности давления и температуры. При этом специфику конкретных задач определяли взаимное положение и движение источника, приемника и атмосферы, а также диапазон частот излучения. Наблюдаемой величиной является угол рефракции в зависимости от угла места прихода луча $\varepsilon(\theta_0)$. В радиодиапазоне для измерения рефракции может быть использован доплеровский сдвиг сигналов, который пересчитывается в угол рефракции. Без ограничения общности можно также рассматривать случай астрономической рефракции, так как для любого источника вне атмосферы рефракцию можно пересчитать к рефракции эквивалентного, бесконечно удаленного вдоль луча источника.

С учетом сказанного 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 Земли и измерения при изменении положения источника или приемника внутри атмосферы (геометрия погружения). Наиболее успешно применялись радиозатменные измерения отечественными и американскими космическими аппаратами, с помощью которых были исследованы атмосферы всех планет Солнечной системы [4–6]. Затменные измерения с космических станций «Салют» и внутриатмосферные измерения атмосферы Земли, выполненные в оптическом диапазоне [7–9], также позволили получить ряд интересных результатов. Все эти задачи сводятся к уравнениям типа Абеля. Наконец, разработаны и успешно применены для обработки результатов астрономических измерений оптической рефракции звезд методы решения обратной задачи рефракции для случая наблюдений с поверхности, где задача сводится к уравнению Фредгольма 1-го рода [10]. Ведутся исследования аналогичной задачи для случая измерений параметров радиосигналов навигационных искусственных спутников Земли (ИСЗ) [11].

В данной работе рассматривается последний из названных выше четырех видов постановки обратной задачи рефракции, который в настоящее время практически не изучен ни с математической, ни с экспериментальной точки зрения.

2. Постановка задачи

Уравнение для решения обратной задачи в данном случае – это уравнение Вольтерры 2-го рода [12]:

$$N(p_h) - \int_{p_h}^{\infty} N(p) \frac{p p_h \sin \theta_0}{(p^2 - p_h^2 \cos^2 \theta_0)^{3/2}} dp = 10^6 \operatorname{tg} \theta_0 \varepsilon(p_h), \quad (1)$$

$p = nr$, $r = r_0 + h$, r_0 – радиус Земли; n – показатель преломления; $N = 10^6(n - 1)$ – индекс рефракции. С помощью соотношения

$$h = \{p/[1 + 10^{-6}N(p)]\} - r$$

профиль $N(p)$ преобразуется в высотный профиль $N(h)$. Геометрия лучей для данного случая представлена на рис. 1.

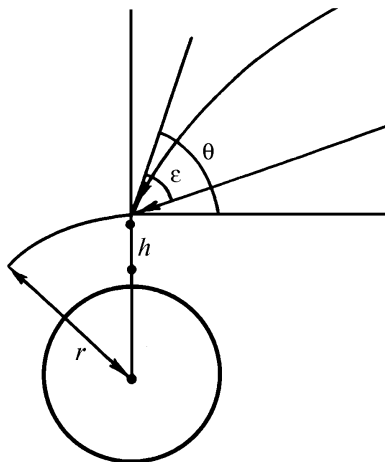


Рис. 1

В общем случае вид ядра уравнения зависит от конкретного вида траектории погружения. Для большей физической наглядности решим задачу для случая, когда погружение объекта происходит таким образом, что угол места θ_0 остается неизменным.

Уравнение (1), вообще говоря, нелинейно, поскольку нижний предел интеграла зависит от искомого индекса рефракции. Однако величина nr мало отличается от значения геоцентрического расстояния r , поэтому систему уравнений можно решать итерационным методом, используя в первом приближении модельный профиль показателя преломления [13]:

$$N(h) = v e^{-\beta h} . \quad (2)$$

3. Результаты численного моделирования

Значения $N(p)$, вычисленные по модельному профилю, использовались для определения индекса преломления во втором приближении. С вычислительной точки зрения решение уравнения Вольтерры 2-го рода устойчиво. Погрешность восстановления профиля индекса преломления по формуле (2) для различных метеоусловий составляет 15–20 N единиц, а во втором приближении эта величина уменьшается в 5–10 раз. Итерационный процесс быстро сходится, поэтому для рассматриваемого уровня погрешности достаточно двух итераций.

Численный эксперимент проводился на основе ансамбля данных аэрологического зондирования в летних условиях ЕТ России. По измеренным значениям метеопараметров на высотах 0,16–25 км были рассчитаны значения индекса преломления $N(p)$. Затем по формуле (1) рассчитывалось значение угла рефракции для определенного угла места.

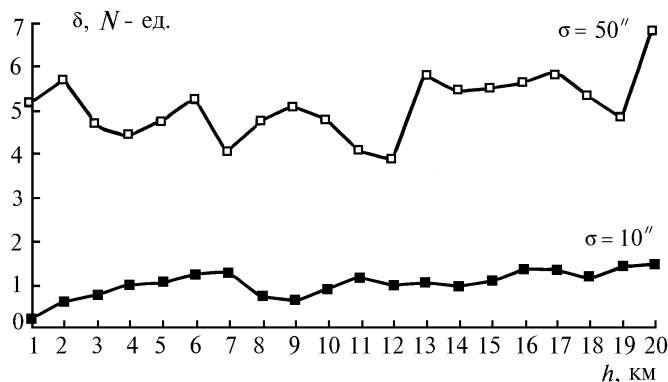


Рис. 2

С целью исследования влияния погрешности измерения на точность решения на вычисленные значения рефракции «накладывалась» погрешность, которая моделировалась нормально распределенной случайной величиной, некоррелированной по углу с нулевым средним и стандартным отклонением σ [14]. На рис. 2 приведены зависимости среднеклиматической погрешности восстановления индекса рефракции δ от высоты для различных $\sigma(\theta_0 = 1^\circ)$.

На больших высотах относительная погрешность восстановления индекса рефракции возрастает, так как «набрасываемая» погрешность становится сравнимой по величине с измеряемым углом рефракции.

В таблице приведены значения погрешности восстановления типичного профиля индекса преломления (давление 1000 Па, температура 30 °С, относительная влажность 46 %) для различных углов места. Полученные результаты показывают, что при небольших величинах погрешности измерения существует диапазон углов, для которых погрешность восстановления минимальна. Это обусловлено тем, что согласно «теореме» Лапласа–Ариани с увеличением угла места рефракция определяется значением показателя преломления в точке приема. Вместе с этим абсолютное значение угла рефракции уменьшается и для определенных углов сравнимо с величиной погрешности измерения. Таким образом, для конкретной погрешности измерения можно выделить наиболее информативный для измерения диапазон углов места.

$\sigma, \text{с}$	$\theta_0, \text{град.}$						
	0,05	0,1	0,3	0,5	0,8	1	3
1	0,138	0,132	0,125	0,118	0,118	0,121	0,254
5	0,354	0,346	0,401	0,418	0,460	0,537	1,26
10	0,691	0,622	0,714	0,778	0,954	1,06	2,55
50	3,07	3,32	3,87	4,01	4,79	5,26	12,8

Перспективы развития данного метода связаны с возможностью восстановления профиля показателя преломления атмосферы по измерениям рефракции в процессе погружения в атмосферу источника или приемника при исследовании планет Солнечной системы с помощью спускаемых аппаратов.

1. Гурвич А.С., Кубасов В.Н., Леонов А.А. и др. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1978. Т. 14. N 5. С. 467–473.
2. Гречко Г.М., Гурвич А.С., Романенко Ю.В. и др. // Докл. АН СССР. 1979. Т. 248. N 4. С. 828–831.
3. Гайкович К.П. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1984. Т. 20. N 8. С. 675–682.
4. Phinney R.A., Anderson D.L. // J. Geophys. Res. 1968. V. 73. N 5. P. 1819–1827.
5. Kliore A.J., Gain D.L., Levy G.S., Eshleman V.R. // Astronaut and aeronaut. 1965. NT–7. P. 72.
6. Lions J.R., Sweetnam D.L., Eshleman V.R. et al. // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. N 13. P. 14987.
7. Гурвич А.С., Кан В., Попов Л.И. и др. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1982. Т. 18. N 1. С. 3–8.
8. Гречко Г.М., Гурвич А.С., Обухов А.М. и др. Использование рефрактометрической информации при зондировании атмосферы из космоса (материалы семинара «Атмосфера–океан–космос» под руководством акад. Г.И. Марчука). М.: ВИНТИ, 1981. Препринт N 13.
9. Соколовский С.В. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1981. Т. 17. N 6. С. 574–579.
10. Гайкович К.П., Гурвич А.С., Наумов А.П. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1983. Т. 19. N 7. С. 675–687.
11. Гайкович К.П. // Радиофизика. 1992. Т. 35. N 3, 4. С. 211–219.
12. Гайкович К.П. Методы наземного рефрактометрического зондирования атмосферы (лекция) // Тезисы докл. 4-й Всесоюзной школы по распространению ММ и СБММ волн в атмосфере (Н. Новгород, сентябрь 1991). Н. Новгород: НИРФИ, 1991. С. 125–130.
13. Колосов М.А., Шабельников А.В. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса. М.: Сов. радио, 1976. 219 с.
14. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. М.: Наука, 1973. 311 с.

Нижегородский научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию
28 августа 1996 г.

K.P. Gaikovich, G.Yu. Khacheva. **Refraction Inverse Problem for Immersion Geometry.**

The refraction inverse problem in the case of a receiver or a source immersion into the atmosphere has been considered. The problem consists of the Volterra 2-nd kind integral equation solution. By numerical simulation based on the radiozond data set, the dependence of the solution precision on refraction measurements errors and on observation elevation angle has been investigated.