

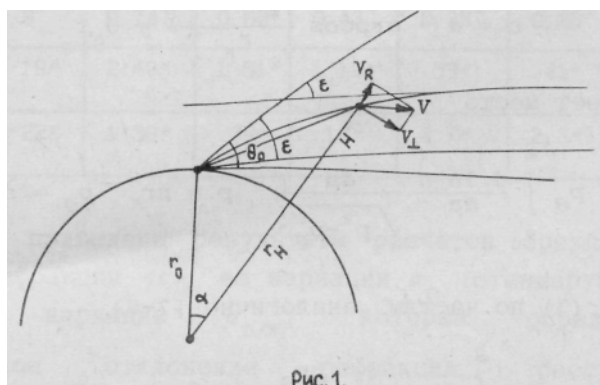
УДК 621.396.96:551.510.52

О НАЗЕМНОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ РАДИОРЕФРАКТОМЕТРИИ
АТМОСФЕРЫ

К.П. Гайкович

Использовано точное соотношение, связывающее доплеровский сдвиг сигнала ИСЗ с величиной астрономической рефракции, что позволило свести задачу восстановления высотного профиля показателя преломления к решению обратной задачи рефракции. Определен диапазон углов наблюдения, на котором измерения являются информативными. На основе численного моделирования получены статистические оценки возможной точности восстановления для различных климатических ансамблей, а также определены требования к точности измерения доплеровской частоты и орбитальных параметров.

Восстановление высотного профиля показателя преломления (n) по вкладу атмосферы в доплеровский сдвиг сигнала, излучаемого с космического аппарата, широко использовалось при радиопросвечивании планет Солнечной системы (см., например, [1, 2]). В этой ситуации, когда и источник и приемник расположены вне исследуемой атмосферы, задача решается путем применения обратного преобразования Абеля к наблюдаемой зависимости измеряемой величины от прицельного параметра. Аналогичным образом решается задача рефракции для источников в оптическом диапазоне [3, 4].



Для геометрии измерений, представленной на рис. 1, когда сигнал ИСЗ принимается на поверхности Земли, решение задачи существенно

усложняется. Впервые задача в такой постановке сформулирована в [5] и решалась в [6]. В данной работе удалось преодолеть ряд трудностей и избежать приближений, которые не позволили реализовать в отмеченных первых работах весь потенциал метода. Основные методические вопросы решения этой некорректной задачи – для случая наблюдений в оптическом диапазоне рассмотрены в [7, 9], но при рассмотрении радиорефракции необходимо учитывать дополнительный вклад влажности в показатель преломления, что требует отдельного анализа.

1. Вычисление рефракции по доплеровскому сдвигу

Соотношение между доплеровской частотой $\hat{\nu}$ и параметрами атмосферы получается путем дифференцирования выражения для фазы сигнала и имеет вид [5]

$$\nu_{\text{Д}} = \frac{\nu}{c r_{\text{H}}} (p_0 \cos \theta_0 V_{\perp} + \sqrt{r_{\text{H}}^2 - p_0^2 \cos^2 \theta_0} V_{\text{R}}), \quad p_0 = n_0 r_0, \quad (1)$$

где r_{H} , V_{\perp} , V_{R} – геоцентрическое расстояние и компоненты скорости источника, ν – частота, θ_0 – угол места, $n_0 = n(r_0)$ – приземное значение.

Из (1) видно, что, зная геометрическое положение ИСЗ и его вектор скорости, по измерениям ν на поверхности Земли можно, решая простое уравнение, определить угол места прихода луча θ_0 .

Далее определяется угол рефракции эквивалентного бесконечно удаленного (вдоль луча) источника через координаты (центральный угол α и геоцентрическое расстояние) реального источника

$$\varepsilon = \alpha - \arccos \frac{p_0 \cos \theta_0}{r_{\text{H}}} + \theta_0, \quad (2)$$

для которого имеет место

$$\varepsilon(p_{\theta}) = - p_{\theta} \int_{p_0}^{\infty} \frac{d \ln n}{dp} \frac{dp}{\sqrt{p^2 - p_{\theta}^2}}, \quad p = nr, \quad p_{\theta} = n_0 r_0 \cos \theta_0. \quad (3)$$

Или, интегрируя (3) по частям, аналогично [7-9]:

$$\int_{p_0}^{\infty} N(p) \frac{pp_{\theta}}{(p^2 - p_{\theta}^2)^{3/2}} = \tilde{\varepsilon}(p_{\theta}), \quad (4)$$

где

$$\tilde{\varepsilon}(p_{\theta}) = -10^{-6}\varepsilon(p_{\theta}) + p_{\theta} \frac{N(p_0)}{\sqrt{p_0^2 - p_{\theta}^2}}. \quad (5)$$

Уравнение (4) является линейным интегральным уравнением Фредгольма 1-го рода относительно распределения $N(p)$, которое пересчитывается в высотный профиль $N(h)$ путем вычисления высотного масштаба:

$$h = \frac{p}{n} - r_0 = \frac{p}{1 + 10^{-6}N(p)} - r_0. \quad (6)$$

2. Определение информативного диапазона углов измерения

Как известно [10], специфика распределения показателя преломления проявляется в заметных вариациях угла рефракции лишь на достаточно малых углах места θ_0 . С ростом угла вариации уменьшаются и рефракция со все возрастающей точностью определяется значением приземного показателя преломления, что составляет содержание так называемой "теоремы Лапласа". Таким образом, диапазон углов, информативных для решения обратной задачи, ограничен сверху углами, на которых естественные вариации рефракции становятся сравнимыми с погрешностью измерений.

Таблица 1

Характеристики рефракции для океанического ансамбля

	θ_0							
	0,01°	0,1°	0,5°	1°	2°	3°	4°	5°
$\langle \varepsilon \rangle$	0,94°	0,9°	0,74°	0,60°	0,43°	0,33°	0,26°	0,22°
σ_{ε}	6'58"	5'18"	2'40"	1'51"	1'12"	53"	41"	34"
σ_{ε}/N_0	6'05"	4'22"	1'30"	39"	12"	4,7"	2,3"	1,2"

В табл. 1 приведены результаты расчетов среднеклиматических значений радиорефракции $\langle \varepsilon \rangle$, ее вариации σ_{ε} (стандартное отклонение от $\langle \varepsilon \rangle$) и вариации σ_{ε}/N_0 , которые определялись как среднеквадратичное отклонение рефракции, рассчитанной по аэрологическим данным ("истинной") от рефракции, рассчитанной по профилю $N^{\circ}(h)$, полученному методом статистической экстраполяции от

приземного значения показателя преломления N_0 согласно

$$N^3(h) = \langle N(h) \rangle + \frac{B_{NN}(0, h)}{\sigma_N^2(0, 0)} (N_0 - \langle N_0 \rangle), \quad (7)$$

B_{NN} - ковариационная матрица, σ_N^2 - дисперсия. Приведенные в табл.1 данные соответствуют ансамблю данных для тропического океана (80 реализаций). В табл. 2 приведены аналогичные параметры для летнего ансамбля ЕТ СССР. Видно, что средние значения и вариации рефракции для океанического ансамбля больше, чем для континентальных условий, что обусловлено влиянием высокого влагосодержания над океаном. Ясно, что, для того чтобы получить информацию о профиле $N(h)$ с точностью, которая превышает точность статистической оценки по приземному значению (7), необходимы измерения с ошибкой, меньшей σ_ε/N_0 . При точности измерений $\delta\varepsilon = 1''$, которую можно считать предельной для измерений рефракции даже в оптическом диапазоне, диапазон информативных углов находится при $\theta_0 < 5^\circ$, а при $\delta\varepsilon = 10''$ -соответственно при $\theta_0 < 2 - 3^\circ$.

Таблица 2

Характеристики рефракции для ансамбля в летних условиях ЕТ СССР

	θ_0							
	0,01"	0,1°	0,5°	1°	2°	3°	4°	5°
$\langle \varepsilon \rangle$	0,70°	0,67°	0,58°	0,48°	0,35°	0,27"	0,22°	0,18°
σ_ε	3'26"	3'16"	2'35"	1'55"	1'13"	52"	40"	33"
σ_ε/N_0	1'30"	1'17"	41"	21"	7"	3,2"	1,7"	1,0"

Таким образом, ограничения на информативный диапазон углов в рассматриваемой задаче являются весьма существенными. Границы информативного диапазона в радиодиапазоне близки к определенным в [8] значениям для оптического диапазона.

3. Методы решения обратной задачи

а) *Метод решения на компактном множестве монотонных функций.* Для решения применялся алгоритм, подробно описанный в [7 - 9], где он был использован для решения обратной задачи рефракции в оптическом диапазоне. Суть метода заключается в минимизации невязки

на компактном множестве ограниченных сверху и снизу некоторыми константами монотонных функций [1]. Численное моделирование по методике [8] показало, что точность метода существенно зависит от выбора первого приближения. Наилучшие результаты получаются, когда в качестве первого приближения используется экстраполированный профиль (7). С точки зрения качества восстановления, неблагоприятным обстоятельством является тот факт, что итерационный процесс может сходиться и к разрывной функции. Удовлетворительные результаты (лучше чем статистические) получаются при точностях $\delta\varepsilon \leq 1''$.

б) *Метод обобщенной невязки А.Н.Тихонова.* Метод использует априорную информацию о гладкости точного решения [11] и позволяет вводить ограничения (точное решение больше или меньше некоторой заданной функции). Он с успехом применялся для решения различных задач [12-15], в том числе, и рассматриваемой [6]. Однако в [6] из-за отмеченных выше, обстоятельств потенциал метода не был реализован в полной мере, и, более того, на основе численного эксперимента сделан вывод о наличии некоторой предельно достижимой точности решения, что находится в противоречии как с теорией [11], в которой показана сходимость решения к точному при $\delta\varepsilon \rightarrow 0$, так и с результатами наших численных экспериментов. Возможно, что такой результат получился из-за того, что с уменьшением погрешности не производилось одновременное увеличение дискретизации счета интеграла, а также дискретизации угловой зависимости правой части.

Выполненные численные эксперименты показали, что до уровня погрешности $\delta\varepsilon \approx 10''$ восстановленные профили, как правило, ближе к исходным, чем статистически экстраполированные (решение можно искать как отклонение от $N^3(h)$).

в) *Метод статистической регуляризации.* Наиболее точные результаты были получены с помощью метода статистической регуляризации [16], который также успешно применялся нами в [7 - 9]. В методе непосредственно используется информация о межуровневых ковариационных связях $N(h)$. Решение ищется на априорном ансамбле, заданном ковариационной матрицей. Плотность вероятности для априорного ансамбля определяется из условия максимума энтропии, а апостериорное распределение находится по формуле Бейеса.

Средний по этому распределению вектор N при заданной правой части (5) определяет решение, которое удовлетворяет уравнению

$$N = \langle N \rangle + (K^* W^{-1} K + B_{NN}^{-1}) K^* W^{-1} (\tilde{\varepsilon} - \langle \tilde{\varepsilon} \rangle), \quad (8)$$

K - матрица ядра в (5), W - ковариационная матрица ошибок измерения.

На рис.2 представлены среднеквадратичные погрешности $6N$ восстановления индекса рефракции для океанического ансамбля при различных значениях (1", 10" и 50") моделируемой погрешности измерения с дисперсией $\delta\varepsilon^2$ по сравнению с точностью оптимальной экстраполяции по N_0 (штрих-пунктир) и величиной естественных вариаций σN (пунктир). На рис.3 – результаты аналогичного статистического анализа для летнего ансамбля ЕТ СССР. Видно, что в каждом случае измерения рефракции являются информативными, т. е. решение обратной задачи заметно улучшает результаты оптимальной экстраполяции при уровне ошибок измерения $\delta\varepsilon \leq 50''$. Среднеквадратичная погрешность восстановления весьма неоднородна по высоте и имеет два максимума, нижний из которых, по-видимому, соответствует высотам, где формируются облака, а верхний – высоте тропопаузы. Точность восстановления возрастает не пропорционально точности измерений, а значительно медленнее, что и является характерной особенностью некорректных задач. Восстановление наиболее эффективно в интервале высот до 4 – 6 км.

4. Требования к доплеровским измерениям

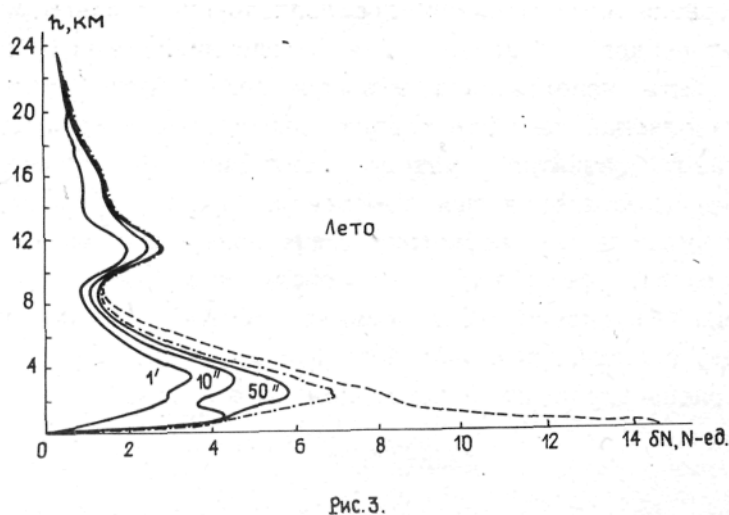
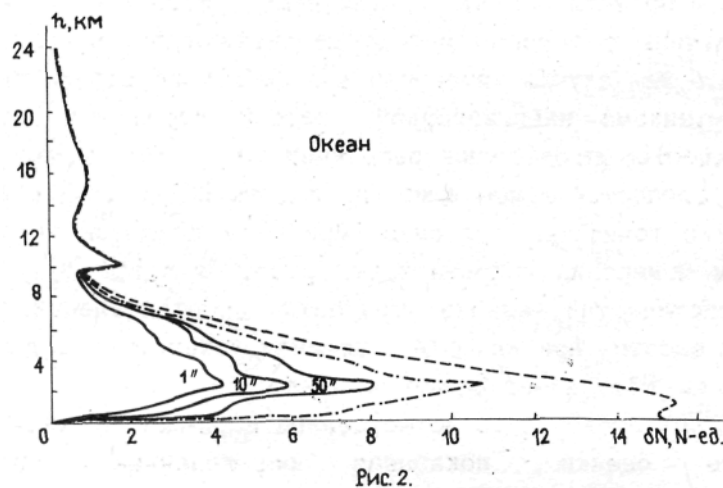
Как видно из (2), точность определения ε зависит от точности определения угла θ_0 по измерениям V_D на основе соотношения (1). Кроме доплеровской частоты в (1) входят высота и компоненты V_L , V_R скорости ИСЗ, а также значение $p_0 = n(r_0)r_0$, т.е. необходимо знать также высоту h_0 пункта наблюдения и приземное значение показателя преломления N_0 . В табл.3 приведены значения погрешностей перечисленных параметров, которые приводят к соответствующему значению погрешности $\delta\varepsilon$ для случая использования высокочастотного канала навигационной системы "Транзит" ($\nu = 400$ МГц, $H = 1000$ км).

Таблица 3

$\delta\varepsilon$	δV_D , Гц	δH , м	δV , см/с	δN , N-ед.	δh_0 , м
1 "	10^{-3}	0,7	0,1	0,1	0,6
10"	10^{-2}	7,0	1,0	1,0	6,0
50"	$5 \cdot 10^{-2}$	35,0	5,0	5,0	30,0

Высокие требования к точности измерения доплеровской частоты V_D , которые следуют из данных табл.3, обусловлены относительно малым вкладом атмосферы в доплеровский сдвиг частоты. Этот вклад, как показали расчеты, для рассматриваемого случая составляет 3–4 Гц в

направлении на горизонт и уменьшается на порядок уже при $\theta_0 \approx 5^\circ$, в то время как ν_D составляет ~ 9000 Гц. Из табл.3 следует, что достичь точности определения рефракции лучше $10''$ весьма затруднительно и кривые на рис.2,3, соответствующие этому уровню точности, характеризуют предельно достижимые точности доплеровской радиорефрактометрии. Данные табл.3 показывают также, что при интерпретации измерений необходим учет дополнительного сдвига частоты, обусловленного релятивистским поперечным эффектом Доплера $\Delta\nu_{\perp} \approx -\nu(V/c)^2 \approx 0,14$ Гц, величина которого сравнима и превосходит допустимые погрешности измерения.



Заключение

В работе выполнено теоретическое рассмотрение возможностей определения высотного профиля показателя преломления радиоволн в атмосфере по измерениям доплеровского сдвига сигнала ИСЗ. Использовано установленное в [5] точное соотношение между величиной доплеровской частоты и рефракцией в атмосфере, что позволило свести проблему восстановления к решению обратной задачи рефракции. Статистический анализ вариаций рефракции показал, что диапазон углов места ИСЗ, в котором измерения являются информативными, расположен на низких углах места. Выполнено численное моделирование восстановления профиля $N(h)$ различными методами. Наилучшие результаты получены с помощью метода статистической регуляризации. Установлено, что для случая измерений доплеровского сдвига сигналов, излучаемых спутниками навигационной системы "Гранзит", предельно достижимая точность определения рефракции $\delta\epsilon \approx 10''$. Это требует измерений v_d с точностью лучше 0,01 Гц, высоты ИСЗ с точностью ≤ 7 м и его скорости с точностью ≤ 1 см/с. При этом диапазон углов места ИСЗ, в котором измерения информативны, расположен при $\theta \leq 2 \div 3^\circ$. Выполнен статистический анализ точности восстановления $N(h)$ в зависимости от высоты. При $\delta\epsilon = 10''$ средняя точность восстановления в слое 1 - 5 км составляет лучше 4 N-ед, т. е. метод позволяет с точностью 25 - 50% отслеживать естественные вариации профиля $N(h)$.

Полученные оценки, показывая определенные перспективы радиорефрактометрии, несомненно нуждаются в экспериментальной проверке, поскольку трудно оценить влияние еще недостаточно изученных в различных условиях горизонтальных неоднородностей в рамках теоретического анализа. Для экспериментальной отработки метода может быть использована навигационная спутниковая система "Гранзит", позволяющая получать данные практически каждый час.

Перспективы развития метода связаны с исследованиями возможностей восстановления при измерениях с некоторой высоты при отрицательных углах места, поскольку такие измерения могут быть, как показывают работы [17, 18] в оптическом диапазоне, весьма информативными. Трудность исследования состоит в необходимости анализа многолучевого сигнала. Особого рассмотрения требуют ситуации волноводного распространения в пограничном слое атмосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kliore A.J., Gain D.L., Levy G.S., Eshleman V.R.//Astronaut and aeronaut. 1965. N T-7. P.72.
2. Lions J.R., Sweetnam D.L., Eshleman V.R. et al.//J.Geophys. Res. 1987. V.92. N 13. P.14987.

3. Гурвич А. С., Загоруйко С. В., Кан В. и др.//ДАН СССР. 1981. Т.259. N 6. С.1330.
4. Гурвич А.С., Кан В., Попов Л.И. и др.//Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1982. Т.18. N 1. С.3.
5. Колосов М. А., Павельев А. Г. //Радиотехника и электроника. 1982. Т.27. N 12. С.2310.
6. Арманд Н.А. , Андрианов В.А., Смирнов В.М. //Радиотехника и ЭлектрОНИКа. 1987. Т.32. N 4. С.673.
7. Василенко Н.А., Гайкович К.П., Сумин М.И.//ДАН СССР. 1986. Т.290. N 6. С.1332.
8. Гайкович К.П., Сумин М.И./Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1986. Т.22. N 9. С.917.
9. Василенко Н.А., Гайкович К.П., Сумин М.И./Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1986. Т.22. N 10. С.1026.
10. Колосов М.А. , Шабельников А.В. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса. - М. :Сов. радио, 1976.
11. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. - М.: Наука, 1983.
12. Гайкович К.П., Резник А.Н., Сумин М.И., Троицкий Р.В. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1987. т.23. N 7. с.761.
13. Гайкович К.П., Сумин М. И., Троицкий Р.В./Изв. вузов. РаДИОфиЗИКа. 1988. Т.31. N 9. С.104.
14. Гайкович К.П., Резник А.Н./Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т.33. N 11. С.1343.
15. Гайкович К.П., Кадыгров Е.Н., Троицкий А.В., Шапошников А.Н.// Тезисы докл. Всесоюз. конф. Применение дистанционных радиофизических методов в исследованиях природной среды. - Ереван, 1990. С.28.
16. Турчин В.Ф., Козлов В.П., Малкевич М.С.//УФН. 1970. т.102. N 3. С.345.
17. Гайкович К.П., Гурвич А.С., Наумов А.П./Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1983. Т.19. N 7. С.675.
18. Бесчастнов С.П., Гречко Г.М., Гурвич А.С. и др./Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1984. Т.20. N 4. С.231.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
19 октября 1990 г.

ON THE GROUND-BASED DOPPLER RADIOREFRACTOMETRY OF ATMOSPHERE

K.P. Gaikovich

The relation between Doppler shift of satellite radioemission and astronomical refraction is used which leads to the problem of index refraction high profile retrieval to the refraction inverse problem. The angle interval where the measurements are useful is determined. On the basis of numerical simulation the statistical estimations of retrieval precision for different climatic statistical sets are derived and the proper measurement precision of Doppler frequency and satellite orbit parameters is determined.