

В.П. Якубов, П.А. Симакова

ОЦЕНКА АТМОСФЕРНОЙ РЕФРАКЦИИ ПО ДОПЛЕРОВСКОМУ ЭФФЕКТУ

Предлагается простая методика оценки угла рефракции волн и приземного показателя преломления по данным о доплеровском смещении частоты при просвечивании атмосферы Земли электромагнитным излучением. Приводится пример обработки экспериментальных данных.

Введение

В настоящее время в связи с интенсивным развитием радио- и оптических средств связи актуальными становятся вопросы более точного и оперативного учета влияния атмосферы на распространение сигналов. Важную роль здесь играет учет рефракционных эффектов. Известно, что рефракция и доплеровское смещение частоты электромагнитного излучения в атмосфере есть пространственное и временное проявления одного и того же эффекта — возмущения фазовой структуры волны на неоднородностях среды распространения. Взаимосвязь угла рефракции и доплеровской частоты широко используется, например, при исследовании атмосфер планет и Солнца методом радиопросвечивания [1]. В условиях атмосферы Земли такая взаимосвязь, несколько усложняясь, также существует [1, 2], но практического применения пока не получила.

В данной работе предлагается простая методика расчета угла рефракции и приземного показателя преломления в сферически-симметричной атмосфере Земли по экспериментально наблюдаемому доплеровскому смещению частоты. Методика может найти приложение для оперативной юстировки каналов связи с использованием остронаправленных радио- и лазерных систем, когда угол рефракции соизмерим или больше ширины их диаграммы направленности.

1. Основные соотношения

Известное выражение для угла полной рефракции принимаемого на Земле излучения от источника, расположенного за пределами атмосферы, может быть преобразовано к виду [2]:

$$\xi = [N_0 - \nu(\varphi)] \operatorname{ctg} \varphi, \quad (1)$$

$$\nu(\varphi) = s \int_0^{\infty} N(u) u [u^2 + s^2]^{-3/2} du, \quad (2)$$

где величина $s = an_0 \sin \varphi$ связана со значением показателя преломления $n_0 = n(a) = 1 + N_0$ и угла прихода радиоизлучения φ у поверхности Земли, радиус которой обозначен через a . В (1) и (2) введены приведенный показатель преломления $N = \ln n$ и переменная интегрирования $u = [r^2 n^2(r) - a^2 n_0^2]^{1/2}$.

Первое слагаемое в (1) описывает рефракцию в приближении плоскостистой атмосферы, а второе, содержащее интеграл (2), учитывает поправку за счет перехода к сферически-симметричной модели атмосферы. Заметим, что поправка на сферичность исчезающе мала при углах прихода φ , близких к зениту: $\nu(\varphi) \ll N_0$. При углах же, близких к горизонту, имеет место асимптотика

$$\lim_{\varphi \rightarrow 0} \nu(\varphi) = N_0. \quad (3)$$

Действительно, проводя в (2) замену $\operatorname{tg} \Theta = u/s$, имеем

$$\nu = \int_0^{\pi/2} d\theta \sin \theta N(u = s \operatorname{tg} \theta)$$

и при $s = an_0 \sin \varphi \rightarrow 0$, очевидно,

$$\lim_{\varphi \rightarrow 0} \nu(\varphi) = N_0 \int_0^{\pi/2} d\theta \sin \theta = N_0.$$

Таким образом, поправка на сферичность сравнима с первым членом в (1). Раскрытие возникающей в (1) неопределенности при $\varphi \rightarrow 0$ приводит к следующему предельному значению угла рефракции:

$$\xi_0 = \lim_{\varphi \rightarrow 0} \xi(\varphi) = -v'(0).$$

При движении источника излучения по круговой траектории будет наблюдаться изменение фазового набега принимаемого на Земле излучения, приводящее к доплеровскому смещению частоты, равному [1, 2]:

$$\Delta F = v(\varphi) \frac{a}{\lambda} \cos \varphi \Omega, \quad (4)$$

где $\lambda = c/f$ — длина волны излучения; $\Omega = d\varphi/dt$ — скорость изменения угла прихода φ .

Задача нахождения угла рефракции ξ по доплеровскому эффекту сводится к определению $v(\varphi)$ из (4) и ее подстановке в (1) с учетом (3). Соотношение (3) дает приземное значение N_0 .

2. Пример оценки угла рефракции

В качестве примера рассмотрим приведенные в [3] данные (рис. 1) о зависимости доплеровского смещения частоты ΔF от угла места E орбитального радиостанции с высотой 1000 км, частота излучения которого $f = 108$ МГц. Влияние ионосферы полностью компенсировано. Заметим, что на рис. 1 нанесены отсчеты и при отрицательных E . Это отражает известный факт возможности наблюдения сигналов при уходе источника за горизонт. Пунктирная кривая на рис. 1 соответствует полиному второй степени, сглаживающему приведенные данные по методу наименьших квадратов. Используя имеющуюся в [3] информацию об угловой скорости dE/dt , частотные данные могут быть преобразованы к зависимости от E величины

$$\bar{v}(E) = \Delta F(E) \left\{ \frac{a}{\lambda} \cos E \frac{dE}{dt} \right\}^{-1}.$$

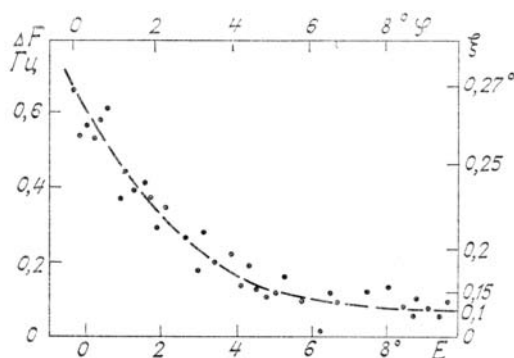


Рис. 1. Наблюдаемое доплеровское смещение частоты орбитального источника, по данным [3]

Кривая 1 для $\bar{v}(E)$ на рис. 2 построена по сглаженным данным на рис. 1.

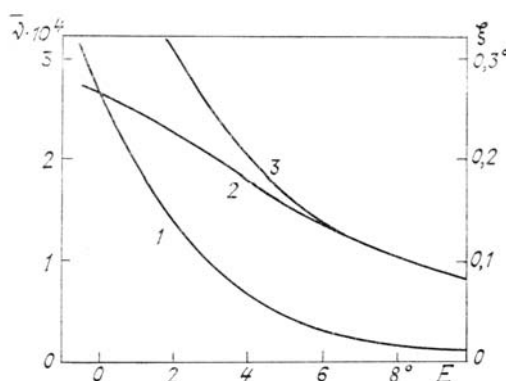


Рис. 2. Зависимость параметров рефракции от угла места источника: 1 — зависимость $\bar{v}(E)$; 2 — угол рефракции по доплеровским данным [3]; 3 — угол рефракции для стандартной атмосферы [5]

Следует иметь в виду, что исходные данные ΔF и полученные по ним \bar{v} даны в зависимости от угла места E , а не угла прихода φ . Это затрудняет прямое использование соотношений (1)–(4). Для преодоления этой трудности проанализируем взаимосвязь E и φ .

Прежде всего заметим, что угол места радиисточника E отличается от угла прихода излучения φ на величину так называемого угла истинной рефракции ε [4], который близок к ранее определенному в (1) углу полной рефракции ξ и точно совпадает с ним в случае бесконечно удаленного источника излучения. Как показывают асимптотические и численные оценки для высот источника излучения более 1000 км погрешность от замены ε на ξ в тропосфере не превышает 5%. Не совершая большой ошибки, будем полагать, что $\varepsilon = \xi$ и $\bar{v}(E) = v(\varphi = E + \xi)$.

Исходя из этого, рассмотрим случай, когда источник излучения лежит на горизонте, т.е. $E_1 = 0$. При этом

$$\varphi_1 = E_1 + \xi_1 = \xi_1 \text{ и } N_0 = \bar{v}(E = -\xi_1).$$

Тогда из (1) имеем

$$\xi_1 = [\bar{v}(-\xi_1) - \bar{v}(0)] \operatorname{ctg} \xi_1.$$

Решая это уравнение относительно ξ_1 находим, что

$$\xi_1 \cong -\bar{v}'(0) = 0,257^\circ \text{ и } N_0 \cong \bar{v}(0) + \xi_1^2 = 294 \cdot 10^{-6}.$$

Для расчета угла рефракции при произвольном E имеем

$$\xi = [N_0 - \bar{v}(E)] \operatorname{ctg}(E + \xi). \quad (5)$$

Итерационное решение уравнения (5) приводит к зависимости $\xi(E)$, (кривая 2 на рис. 2), отсчетная сетка для которой нанесена по вертикали справа. На основе этой зависимости можно указать предельное регулярное значение угла рефракции $\xi_0 = 0,26^\circ$. Для наглядности на рис. 1 полученные результаты сопоставлены с исходными и экспериментальными данными путем нанесения отсчетной сетки углов рефракции по вертикали справа. По горизонтали сверху нанесена сетка отсчетов углов прихода принимаемого излучения $\varphi = E + \xi$.

В целом полученные значения угла рефракции меньше тех, которые вытекают из теории [5] для экспоненциального профиля показателя преломления с тем же N_0 (кривая 3 на рис. 2). Это указывает на отличие реального существовавшего профиля от стандартной модели тропосферы. Точность приведенных нами результатов определяется главным образом погрешностями аппроксимации ΔF при $E \rightarrow 0$. Ошибка здесь в 0,05 Гц приводит к погрешности в определении ξ порядка 10%.

Заключение

Предлагаемая методика позволяет проводить оценку угла рефракции непосредственно по доплеровским данным, получение которых не связано с необходимостью применения прецизионных угломерных приборов. Угловая точность измерений при полной реализации всех потенциальных возможностей методики будет определяться точностью измерения частоты. Нахождение значения показателя преломления у поверхности Земли не требует привлечения метеоданных или сложного аппарата решения обратной задачи рефракции. Получаемые оценки угла рефракции и приземного показателя преломления справедливы в пределах частотного диапазона, для которого дисперсия показателя преломления и степень поглощения не существенны.

1. Яковлев О. И. Распространение радиоволн в Солнечной системе. М.: Сов. радио. 1974. 192 с.
2. Якубов В. П., Симакова Н. А. // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32. № 7. С. 1367.
3. Norfield H. S. // J. Geophys. Res. 1963. V. 68. № 18. P. 5157.
4. Калинин А. И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолиний. М.: Связь. 1979. 296 с.
5. Колосов М. А., Шабельников А. В. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса. М.: Сов. радио. 1976. 220 с.

Сибирский физико-технический институт
им. В.Д. Кузнецова, Томск

Поступила в редакцию
28 июня 1988 г.

V. P. Yakubov, N. A. Simakova. **Estimation of Atmospheric Refraction from Doppler Shift.**

A simple procedure for estimating the refraction angle and surface-layer refractive index from the Doppler shift of the electromagnetic radiation propagating through the atmosphere is proposed. An example of the experimental data interpretation is given.