

В.П. Якубов, Н.А. Симакова, М.А. Ерофеева

К ОЦЕНКЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ АТМОСФЕРЫ ПО РЕФРАКЦИОННЫМ ДАННЫМ

Предлагаемая ранее методика определения приземного показателя преломления дополняется простым способом оценки интегральной толщины атмосферы по рефракционным данным. Приводится пример его применения к обработке экспериментальных данных.

Одним из основных факторов, ограничивающих потенциальную точность лазерных и радиосистем связи, локации, дальнометрирования и навигации, является влияние атмосферы. Так, современные требования точности дальнометрирования характеризуются величиной порядка сантиметров, а рефракционные поправки могут достигать дециметров и метров [1]. Параметром, описывающим рефракционную поправку в дальности, является интегральная толщина атмосферы H . Для точного определения H необходимо знать высотную зависимость показателя преломления $n(h)$. В данной работе на основе развития описанной в [2] методики предлагается простой способ приближенной оценки интегральной толщины атмосферы и поправки в дальности по рефракционным данным без восстановления высотной зависимости $n(h)$.

Известно [3], что при расположении источника излучения в зените рефракционная поправка в дальности до него определяется оптической толщиной атмосферы ΔL_0 и связана с ее интегральной толщиной

$$H = \int_0^{\infty} (n - 1) dh / (n_0 - 1) \quad (n_0 \equiv n(0)) \quad (1)$$

соотношением $\Delta L_0 = H \cdot (n_0 - 1)$. При наклонном визировании источника излучения под углом места $\varphi \geq 15^\circ$ эта поправка возрастает и находится как $\Delta L \approx \Delta L_0 / \sin \varphi$.

Для оценки интегральной толщины атмосферы будем исходить из введенного в [2] интегрального соотношения

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

связывающего в приближении сферически симметричной атмосферы рефракционные данные $\nu(s)$ и высотный профиль показателя преломления $n(h) = 1 + N(u)$. Здесь $s = n_0 a \sin \varphi$, a — радиус Земли и введена замена переменной

$$u = [(a + h)^2 n^2(h) - a^2 n_0^2]^{1/2}. \quad (3)$$

Существенно то, что, как показано в [1], автоматически появляется именно u , а не h , когда показатель преломления представлен в виде «единицы плюс нечто».

Значения $\nu(s)$ выражаются через измеренные доплеровское смещение частоты или угол полной рефракции [2]. Полагая далее зависимость $\nu(s)$ известной в широком диапазоне углов φ , проинтегрируем левую и правую части соотношения (2) по s . В результате получим

$$\int_0^{\infty} \nu(s) ds = \int_0^{\infty} N(u) du.$$

Как следует из замечания после (3)

$$\int N(u) du \neq \int (n(h) - 1) dh, \text{ ибо } du/dh \neq 1$$

Теперь, выделяя приземное значение $N_0 = N(0)$, определим интегральный масштаб атмосферы по переменной u как

$$R = \int_0^{\infty} N(u) du / N_0 = \int_0^{\infty} v(s) ds / N_0. \quad (4)$$

Этому R однозначно соответствует толщина атмосферы H , определяемая согласно (3) уравнением

$$H = [R^2 + a^2 n_0^2]^{1/2} / n(H) - a. \quad (5)$$

Точное решение уравнения (5) возможно лишь при известном профиле показателя преломления $n(h)$, нахождение которого есть суть обратной задачи [1]. Приближенную оценку H можно получить без решения обратной задачи, если в (5) заменить $n(H) \approx (1 + n_0)/2$, и тогда

$$H = [R^2 + a^2 n_0^2]^{1/2} / (1 + N_0/2) - a. \quad (6)$$

Как показывают численные оценки для различных функциональных зависимостей $n(h)$, возникающая при этом погрешность не превышает $\pm 7\%$. Заметим, что оценка H через R , не совпадает точно с определением интегральной толщины атмосферы в (1). Оказывается, что согласно (6) значение H несколько занижается относительно (1). В целом, степень отличия небольшая и, например, для параболического профиля не превышает 10%.

Проиллюстрируем предлагаемую методику на примере конкретных экспериментальных данных о рефракционном сдвиге частоты [4], для которых в [2] были найдены значения $\tilde{v}(s_j) = v(s_j) + \delta_j$, где δ_j — ошибки измерений. Поскольку в [4] исходные данные сильно зашумлены и приведены лишь для ограниченного диапазона углов $\varphi \in [0, 14^\circ]$, то прямое интегрирование (4) невозможно. Преодолеть эту трудность можно, если учесть, что за пределами заданного диапазона углов φ функция $v(s)$ быстро убывает. Предлагается экспериментальные данные сначала аппроксимировать по методу наименьших квадратов (МПК) гладкой убывающей функцией и затем проинтегрировать ее. Конечно, выбор этой функции достаточно произволен. Нам представляется подходящей аппроксимация вида

$$\tilde{v}(s_j) \simeq v(s_j) + \delta_0, \quad v(s) = N_0 \exp(-s/R),$$

где N_0 соответствует приземному значению $N(u)$, R совпадает с интегральным масштабом (4), а параметр δ_0 имеет смысл не скомпенсированной в экспериментальных данных возможной постоянной ошибки, связанной, например, с уходом частоты или с неучтенной радиальной скоростью источника излучения. В результате подбора параметров с помощью МНК получаются следующие значения: $N_0 = 289 \pm 13N$, где $N = 10^{-6}$; $R = 299 \pm 27$ км, $\delta_0 = (15 \pm 5) \cdot 10^{-6}$. Для интегральной толщины атмосферы и рефракционной поправки в дальности при этом сопоставляются оценки $H = (7,9 \pm 1,5)$ км и $\Delta L_0 = (2,3 \pm 0,5)$ м. Разброс найденных параметров определяется уровнем зашумленности исходных данных, который равен среднеквадратической погрешности выбранной аппроксимации $\sigma = 19 \cdot 10^{-6}$. В целом согласно предлагаемой методике рефракционная поправка в дальности находится с ошибкой, не превышающей 20%, возникающих при использовании усредненных метеоданных [3].

Рассмотренная методика может быть полезной для оперативной коррекции атмосферного влияния на точность определения дальности до источника излучения электромагнитных волн, движущегося за пределами атмосферы. Влияние атмосферы возможно уменьшить не менее чем в пять раз при использовании данных о доплеровском сдвиге частоты или о величине угла рефракции без привлечения метеозмерений и без решения обратной задачи восстановления высотной зависимости показателя преломления. Результаты сохраняют силу для оптического и радиодиапазонов, в пределах которых дисперсия показателя преломления и степень поглощения не существенны.

1. Зуев В. Е. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 1. С. 5.
2. Якубов В. П., Симакова Н. А. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 10. С. 48.
3. Бин Б. Р., Даттон Е. Дж. Радиометеорология. Л.: Гидрометеоздат, 1971, 362 с.
4. Norfield H. S. // J. Geophys. Res. 1963. V. 68. № 18. P. 5157.

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

Поступило в редакцию
10 января 1989 г.

V. P. Yakubov, N. A. Simakova, M. A. Erofeeva. **On the Estimation of the Atmospheric Integral Thickness Using the Refraction Data.**

Earlier proposed procedure of estimating the ground layer refractive index is expanded by a simple method of estimation of the integral thickness of the atmosphere using the refraction data. An example of the experimental data interpretation is given.