

С. И. Хоменко, Г. И. Хлопов, Д. Д. Халамейда

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: khalameyda@ire.kharkov.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕФРАКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТРОПОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА

Приведены результаты полугодичного цикла измерений градиента коэффициента преломления тропосферы за период зима–лето по результатам измерений угла прихода с помощью радиоинтерферометра, принимающего радиосигнал геостационарного спутника Земли *Asiasat 3S*. Проведен анализ и обоснование полученных результатов. Исследованы некоторые явления в тропосфере, приводящие к наблюдавшимся в процессе измерений аномально большим значениям градиента коэффициента преломления. Ил. 9. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: рефракция, интерферометр, геостационарный спутник, градиент коэффициента преломления, экспоненциальный высотный профиль коэффициента преломления.

Условия распространения радиоволн оказывают значительное влияние на работу радиосистем [1], в частности рефракционные явления в тропосфере могут снижать точность систем глобальной навигации. Поэтому разработка методов, позволяющих определить высотный профиль коэффициента преломления тропосферы с дальнейшим расчетом рефракционных параметров, является актуальной задачей. Данные о профиле могут быть также полезны для систем управления воздушным движением при заходе на посадку самолета.

В работе [2] предложено использовать радиоинтерферометр для измерения градиента коэффициента преломления в рамках экспоненциальной модели тропосферы

$$n(h) = 1 + \Delta n_0 \exp\left(\frac{g_n h}{\Delta n_0}\right), \quad (1)$$

где $\Delta n_0 = n_0 - 1$; n_0 – приземный коэффициент преломления; g_n – градиент коэффициента преломления.

Также были приведены требования к элементам антенно-фидерной системы радиоинтерферометра и произведена оценка влияния флуктуаций турбулентной тропосферы на точность измерения [3], а экспериментальная установка и ее характеристики описаны в работе [4].

В настоящей работе приведены результаты цикла измерений градиента коэффициента преломления g_n , проведенных в Харькове в течение периода зима–лето с помощью разработанного и изготовленного аппаратного комплекса, описанного в работе [4].

На рис. 1 приведены результаты измерений градиента, где по оси абсцисс отложено время проведения измерений, а по оси ординат – значения градиента. При этом штрихпунктирная линия соответствует тренду среднего значения g_n , аппроксимированному полиномом второй степени, а затемненная область соответствует среднеквадратическому отклонению (СКО) g_n с усреднением в 30 сут.

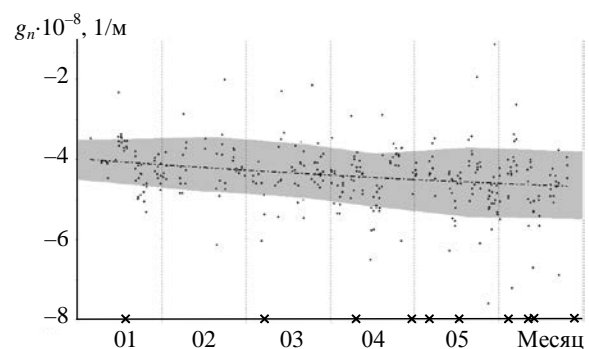


Рис. 1. Результаты измерений градиента коэффициента преломления g_n

Как следует из рисунка, сезонный ход среднего значения и СКО градиента коэффициента преломления выражены слабо, что находит подтверждение в результатах исследований, описанных в работе [5], где подобные измерения проводились в аэропорту города Афины (Греция) с помощью разнесенных по высоте контактных датчиков.

Однако, как было отмечено в работе [4], при измерениях имеют место аномальные значения градиента в случаях, когда форма профиля сильно отличается от экспоненциальной. На рисунке эти случаи отмечены крестиками на оси абсцисс.

Чтобы получить представление о характере распределения измеренных данных, на рис. 2 построена гистограмма значений градиента коэффициента преломления за весь период исследований.

Количество разбиений гистограммы определялось с помощью критерия Старджеса [6] $bin = 1 + \log_2 n_{изм}$, где bin – количество ячеек; $n_{изм}$ – количество измерений. Анализируя характер полученной зависимости, следует отметить ее близость к нормальному закону:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2)$$

где m – среднее значение; σ – СКО случайного процесса.

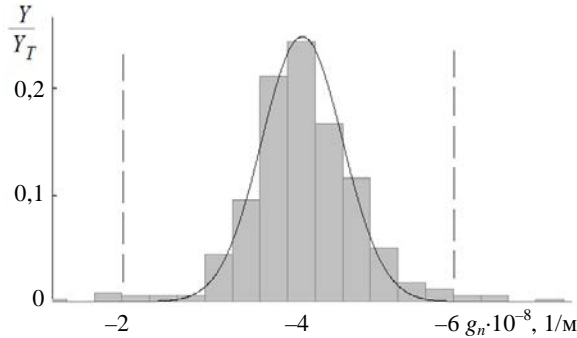


Рис. 2. Гистограмма измеренных значений градиента g_n

В рассматриваемом случае среднее значение равно $g_n = 4,4 \cdot 10^{-8}$, дисперсия – $\sigma^2 = 5,4 \cdot 10^{-17}$, а вид аппроксимирующего закона распределения показан сплошной линией на рис. 2.

Проведенный цикл измерений показал, что основная часть измеренных значений ($\geq 99\%$) лежит в пределах представлений, которые следуют из экспоненциальной модели (1). Поэтому в работе исследованы условия, при которых возможны столь существенные вариации углов отклонения, отмеченные на рис. 1 крестиками.

Рассмотрим биэкспоненциальную модель тропосферы [7], которая позволяет более точно описывать процессы, происходящие в тропосфере (рис. 3), чем экспоненциальная модель (1), и записывается в виде

$$n(h) = \begin{cases} n(h) = 1 + \Delta n_0 \exp\left(\frac{g_{n0}h}{\Delta n_0}\right), & \text{если } h < h_b, \\ n(h) = 1 + \Delta n_1 \exp\left(\frac{g_{n1}h}{\Delta n_1}\right), & \text{если } h \geq h_b, \end{cases} \quad (3)$$

где n_0, n_1, g_{n0}, g_{n1} – параметры модели.

Расчет рефракционной ошибки при пеленгации удаленного источника, расположенного вне пределов тропосферы, производился путем численного решения интегрального уравнения [4]

$$\frac{\delta}{(n_0 - 1)a \sin \alpha_a} = - \int_a^R dh \frac{1}{n(h) \sqrt{n^2(h)h^2 - (n_0 - 1)^2 a^2 \sin^2 \alpha_a}} \frac{dn}{dh}, \quad (4)$$

где R – высота верхней границы тропосферы.

Параметры верхней ветви профиля задавались в виде стандартного профиля: $N_1 = 300$ Nед., $g_{n1} = -0,397 \cdot 10^{-7}$ 1/м, градиент g_{n0} варьировался в пределах $(-2 \div 1) \cdot 10^{-7}$, а значение величины приземного коэффициента преломления определялось исходя из заданных параметров модели.

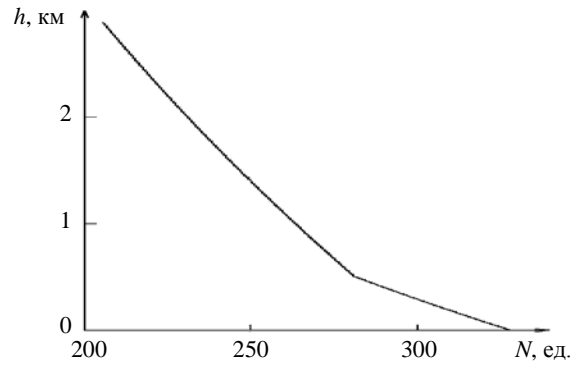


Рис. 3. Биэкспоненциальный профиль коэффициента преломления тропосферы

На рис. 4 приведены результаты расчетов, которые показывают, что данная модель не позволяет объяснить столь широкую амплитуду полученных вариаций значений рефракционных ошибок, наблюдаемых в эксперименте.

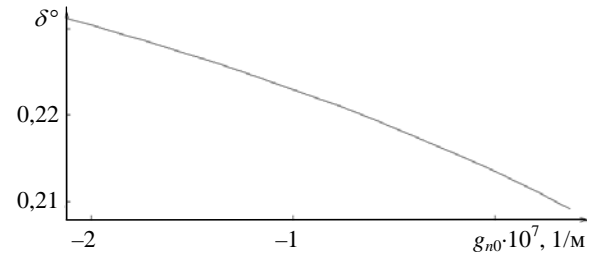


Рис. 4. Зависимость рефракционной ошибки от параметра g_{n0} для биэкспоненциальной модели высотного профиля

С другой стороны, гидрометеорообразования, такие как облака, могут образовывать самые разнообразные формы, и на границах гидрометеорообразований изменения коэффициента преломления N часто превышает 40 Nед. [8]. Рассмотрим два случая, когда форму облака можно аппроксимировать клином и шаром, как показано на рис. 5, где приведена геометрия трассы при прохождении электромагнитной волны (ЭМВ) через клиновидное облако.

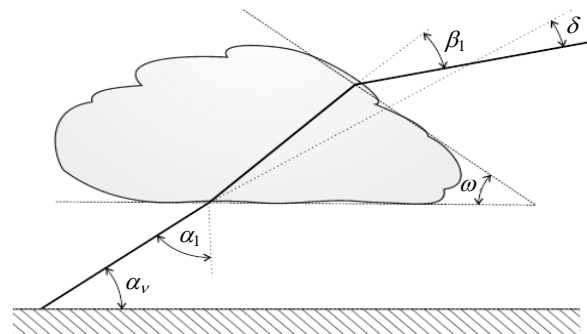


Рис. 5. Прохождение ЭМВ через клиновидное облако

Для расчета угла рефракционной ошибки, который в рассматриваемом случае соответствует

углу отклонения $\delta_{пр}$, можно воспользоваться простыми геометрическими соотношениями [9], которые после несложных преобразований позволяют получить выражение

$$\delta_{пр} = \alpha_1 - \omega + \arcsin \left\{ \frac{n_2}{n_1} \sin \left[\omega - \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin(\alpha_1) \right) \right] \right\}. \quad (5)$$

Зависимость угла рефракционной шибки δ от угла ω при вершине призмы для различных значений перепадов коэффициента преломления на границе облака ΔN показаны на рис. 6.

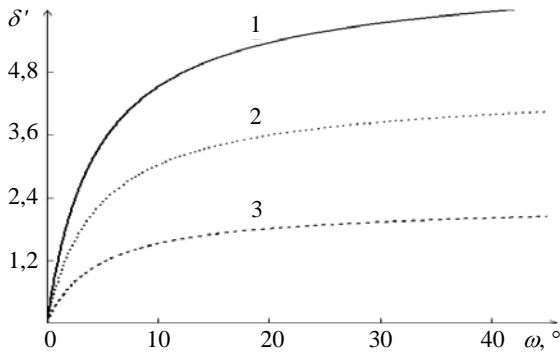


Рис. 6. Зависимость угла отклонения $\delta_{пр}$ от угла при вершине призмы ω : 1 – $\Delta N = 150$; 2 – $\Delta N = 100$; 3 – $\Delta N = 50$

Как видно, значение угла отклонения для $\Delta N = 150$ может достигать $5'$, что на порядок больше, чем для применявшейся в расчетах экспоненциальной модели и достаточно близко к экспериментально наблюдаемым результатам (размах рефракционной ошибки натурных измерений δ составляет $12'$).

Аналогичная ситуация также наблюдается для метеорологических объектов шаровидной формы, которые характерны для кучево-дождевой облачности [8]. В этом случае использование геометрических соотношений [9] позволяет получить зависимость угла отклонения от относительного удаления траектории луча от центра сферы $\Delta l/r_{сф}$ в следующем виде:

$$\delta_{сф} = \arcsin \left\{ \frac{n_2}{n_1} \sin \left[\arcsin \left(\frac{\Delta l}{r_{сф}} \right) - \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \frac{\Delta l}{r_{сф}} \right) \right] \right\} - \arcsin \left(\frac{\Delta l}{r_{сф}} \right), \quad (6)$$

где Δl – удаления траектории луча от центра сферы; $r_{сф}$ – радиус сферического метеообразования.

Результаты расчетов отклонения луча в случае шаровидного гидрометеообразования приведены на рис. 7.

Как видно, преломление лучей на границе шаровидных гидрометеообразований приводит

к углам отклонения того же порядка $5'-6'$, как и для клиновидных метеообъектов. Таким образом, при определенных условиях явление преломления на гидрометеообразованиях может маскировать отклонения луча за счет рефракции и вызывать аномально большие вариации значений угла прихода, что наблюдалось в предварительных экспериментах [4]. Можно предположить, что подобный эффект может иметь место и при других условиях распространения радиоволн, в том числе при «высвечивании» энергии из слоистых образований [10].

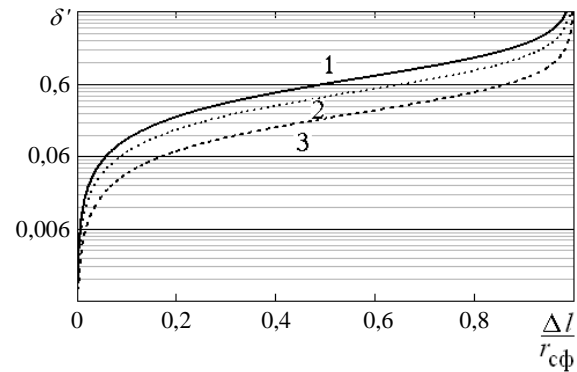


Рис. 7. Зависимость угла отклонения сферой $\delta_{сф}$ от относительного расстояния $\Delta l/r_{сф}$: 1 – $\Delta N = 150$; 2 – $\Delta N = 100$; 3 – $\Delta N = 50$

Поэтому чтобы исключить описанные выше явления, приводящие к искажению данных, в процессе проведения натурных измерений с помощью разработанного радиофизического комплекса производился контроль условий распространения для ограниченного набора экспериментов. На рис. 8 приведены отобранные данные, которые получены в условиях, когда форма высотного профиля коэффициента преломления контролировалась контактными измерениями с помощью рефрактометра, установленного на шаре-зонде, и была близка к экспоненциальной модели (рис. 9).

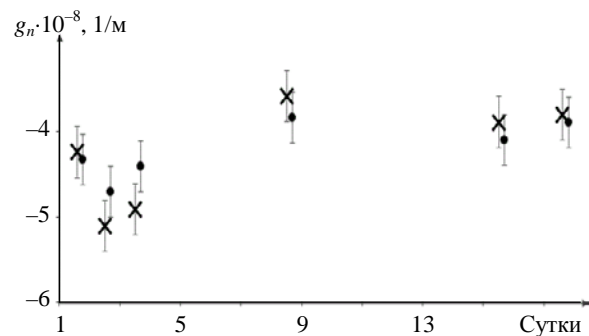


Рис. 8. Измерение градиента коэффициента преломления: контактные измерения – кружки, интерферметрические измерения – крестики

Как видно, в этом случае результаты дистанционных измерений с помощью разработанно-

го радиointерферометра близки к данным контактных измерений (рис. 8). Можно предположить, что наблюдавшиеся отклонения результатов от расчетных величин обусловлены не погрешностью разработанной аппаратуры, а отличием реальных условий распространения радиоволн от использованных в модели.

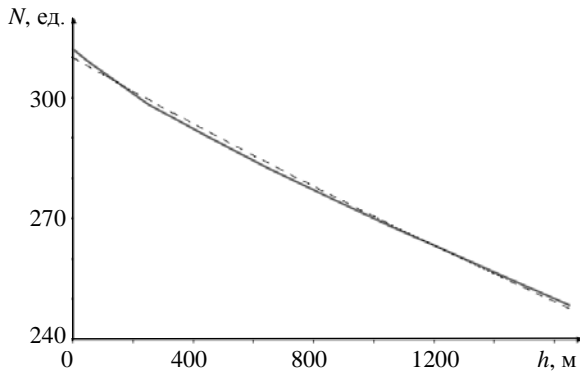


Рис. 9. Высотный профиль коэффициента преломления (сплошная кривая) и его аппроксимация экспонентой (пунктирная кривая)

Параметры реальной тропосферы не всегда описываются экспоненциальной моделью, поэтому использование описанного метода может быть оправдано только в определенных условиях, которые соответствуют выбранной модели. С другой стороны, полученные результаты говорят о необходимости расширения условий применимости описанного метода измерения рефракционных свойств тропосферы путем исследования работы радиointерферометра с другими моделями тропосферы, а также разработки новых моделей.

Выводы. В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- Показано, что сезонный ход среднего значения градиента коэффициента преломления и его СКО выражен слабо, что подтверждает результаты контактных измерений, описанных в литературе.
- Основная часть измерений градиента коэффициента преломления в приземном слое тропосферы, проведенных с помощью интерферометрического метода, адекватно описывается экспоненциальной моделью тропосферы. При этом среднее значение градиента за период измерений зима–лето составляет $g_n = 4,1 \cdot 10^{-8}$, а СКО градиента – $\sigma_g = 7,3 \cdot 10^{-9}$.
- Показано, что преломление лучей на границах метеообразований может маскировать явление рефракции, что позволяет объяснить существенно большие отклонения приходящего луча по сравнению с расчетными данными для экспоненциальной модели тропосферы.

Библиографический список

1. Калинин А. И. Распространение радиоволн и работа радиотелескопов / А. И. Калинин, Е. Л. Черенкова. – М.: Связь, 1971. – 440 с.
2. Халамейда Д. Д. Инструментальные ошибки интерферометрического метода исследования рефракции в тропосфере на трассе ГИСЗ – Земля / Д. Д. Халамейда // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2008. – 13, № 3. – С. 503–511.
3. Халамейда Д. Д. Влияние флуктуаций коэффициента преломления радиоволн в тропосфере на работу радиointерферометра / Д. Д. Халамейда // Радиофизика и электрон. – 2010. – 1(15), № 4. – С. 39–44.
4. Хоменко С. И. Измерительный интерферометрический комплекс для исследования рефракционных свойств тропосферы с помощью радиоизлучения геостационарных искусственных спутников Земли / С. И. Хоменко, Г. И. Хлопов, Д. Д. Халамейда // Радиофизика и электрон. – 2011. – 2(16), № 3. – С. 61–66.
5. Isaakidis S. A. Ten years analysis of Tropospheric refractivity variations / S. A. Isaakidis, T. D. Xenos // Annals of geophysics. – 2004. – 47, N 4. – P. 1333–1337.
6. Громыко Г. Л. Общая теория статистики. Практикум / Г. Л. Громыко. – М.: ИНФРА, 1999. – 139 с.
7. Bean V. R. Radio Metrology / V. R. Bean, E. J. Dutton. – N. Y.: Dover, 1968. – 435 p.
8. Калинин А. И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиотелескопов / А. И. Калинин. – М.: Связь, 1979. – 293 с.
9. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. – 721 с.
10. Кукушкин А. В. Загоризонтное распространение УКВ радиоволн над морем / А. В. Кукушкин, В. Д. Фрейлихер, И. М. Фукс // Изв. вузов. Радиофизика. – 1987. – 30, № 7. – С. 811–823.

Рукопись поступила 19.03.2012

S. I. Khomenko, G. I. Khlopov, D. D. Khalameyda

EXAMINATION OF TROPOSPHERIC REFRACTION USING RADIOINTERFEROMETER

Measurement results of refraction gradient during a half of the year with the help of a radiointerferometer measuring arrival angle of radiosignals of geostationary satellite are described. Analysis and justification of obtained results are carried out.

Key words: refraction, interferometer, geostationary satellite, gradient of refraction index.

С. И. Хоменко, Г. И. Хлопов, Д. Д. Халамейда

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕФРАКЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРОПОСФЕРИ ЗА ДОПОМОГОЮ РАДІОІНТЕРФЕРОМЕТРА

Наведено результати піврічного циклу вимірів градиента коефіцієнта заломлення тропосфери за період зима–літо за результатами вимірів кута приходу за допомогою радіointерферометра, що приймає радіосигнал геостационарного штучного супутника Землі *Asiasat 3s*. Проведено аналіз і обґрунтування отриманих результатів. Досліджено деякі явища в тропосфері, що приводять до одержаних в процесі вимірів аномально великих значень градиента коефіцієнта заломлення.

Ключові слова: рефракція, інтерферометр, геостационарний супутник, градієнт коефіцієнта заломлення, експоненціальний висотний профіль коефіцієнта заломлення.