

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕФРАКЦИОННЫХ ПОПРАВОК К РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ КООРДИНАТ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Применение координатно-временных измерений в различных областях науки, техники и промышленности в последнее время становится все более интенсивным. Увеличивается количество приборов, осуществляющих такие измерения, растет их точность. Несмотря на разнообразие типов измерительных приборов в данной области (это классические астрономо-геодезические инструменты, оптические и радиодальномеры, радиотелескопы, радиоинтерферометры со сверхдлинной базой, радионавигационные спутниковые системы, системы передачи точного времени и др.), так или иначе все они используют измерения каких-либо параметров электромагнитного сигнала, распространяющегося в земной атмосфере и за ее пределами.

В то же время требования к точности координатных измерений во многих областях их применения удовлетворяются еще не в полной мере.

Погрешности определения координат (а это – погрешности измерения углов и дальностей между объектами) в общем случае можно классифицировать как инструментальные погрешности (т.е. погрешности приборов) и погрешности, вызванные влиянием внешней среды, в данном случае – земной атмосферы. В связи с быстрым развитием высоких технологий точность современных приборов становится все выше и в большинстве случаев может удовлетворить современные требования. Поэтому определяющим фактором при формировании погрешности координатных измерений становится атмосфера Земли, главным образом, ее приземная часть – тропосфера.

Тропосферные поправки к результатам измерений дальности, осуществляемых с помощью электромагнитных волн, обычно вводятся методами Марини-Мюррея (в оптическом диапазоне длин волн) [1], Дэвиса, Герринга, Нила (в радиодиапазоне) [2, 3, 4]. В качестве исходных данных эти методы используют метеорологические параметры, измеренные на поверхности Земли. Как показали многочисленные исследования [5], эти методы являются наиболее точными. Однако соотношения, определяющие поправки к результатам координатных измерений и являющиеся основой упомянутых методов, получены в пренебрежении ряда рефракционных эффектов.

Известно, что при разработке методов Марини-Мюррея, Дэвиса, Герринга, Нила строились "функции отображения" (так называемые *mapping functions*), учитывающие зависимость атмосферных поправок от зенитного угла наблюдаемого объекта. Функции отображения в этих методах имеют смысл коэффициентов сомножителей при формуле Саастамойнена [6], определяющей групповую задержку для наблюдений в зенит. Такие функции строятся на основе результатов численного моделирования атмосферных поправок как интегралов вдоль траектории распространения электромагнитного сигнала для различных зенитных углов. Однако при этом не учитывается величина расстояния между точкой наблюдения и наблюдаемым объектом, что приводит к погрешностям определения атмосферных поправок. В данной работе проведены исследования величин таких погрешностей.

Рассмотрим задачу распространения электромагнитной волны в неоднородной земной атмосфере. На рис. 1 представлена схема прохождения электромагнитного луча. Рефракционные поправки к измеренному расстоянию L (соответствует отрезку OS) до объекта (на рисунке обозначенного S) в приближении сферически слоистой атмосферы выражаются интегралами

$$\Delta S = \int_{r_0}^{r_s} \frac{(n-1)nrdr}{r_0 \sqrt{n^2 r^2 - n_0^2 r_0^2 \sin^2 Z_0}}, \quad (1)$$

$$\Delta D = \int_{r_0}^{r_s} \frac{nrdr}{r_0 \sqrt{n^2 r^2 - n_0^2 r_0^2 \sin^2 Z_0}} - L, \quad (2)$$

а уравнение траектории луча в полярных координатах определяется как

$$\Phi = \int_{r_0}^{r_s} \frac{n_0 r_0 dr}{r_0 r \sqrt{n^2 r^2 - n_0^2 r_0^2 \sin^2 Z_0}}, \quad (3)$$

где ΔS – групповой набег электромагнитного сигнала в земной атмосфере; ΔD – поправка, учитывающая рефракционное искривление траектории; Φ – угол между векторами \mathbf{r}_0 и \mathbf{r} ; $n=n(r)$ – показатель преломления воздуха в зависимости от высоты над уровнем моря; $r=|\mathbf{r}|$, \mathbf{r} – радиус-вектор текущей точки траектории (центр полярной системы координат находится в центре Земли); Z_0 – видимый зенитный угол цели.

При построении функций отображения в работах [2, 3, 4], как и во многих других, интегралы (1), (2) брались до верхней границы атмосферы (на рис. 1 – точка Н), т.е. высота цели над поверхностью Земли не учитывалась. В случае вычисления групповой задержки сигнала (1) такое упрощение для поправочных формул, использующих зависимость от видимого зенитного угла, не приводит к ошибке, так как очевидно, что при $r > r_H$ подынтегральная функция в (1) равна нулю ($n=1$). Однако при вычислении рефракционного удлинения траектории (2) такое допущение приводит к погрешности, величина которой (что не трудно показать простыми вычислениями исходя из рис. 1) пропорциональна квадрату отрезка НН'.

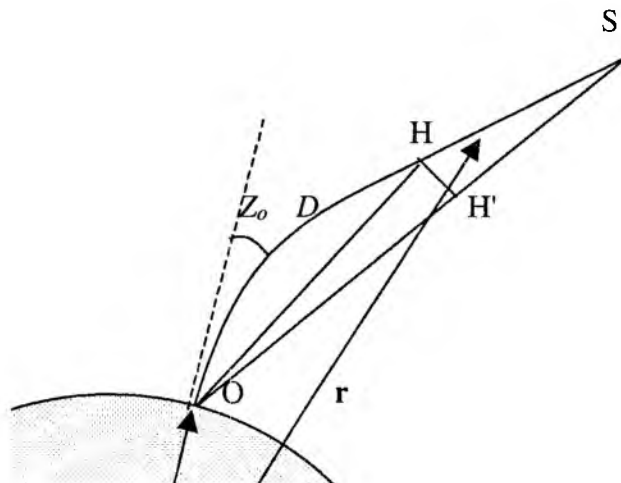


Рис. 1

Приближенные методы определения угла рефракции α (т.е. угла между истинным и видимым направлениями на объект), использующие, например, Пулковские таблицы рефракции [7] или теорему Ориани – Лапласа [8] также приводят к подобной погрешности. Эти методы определяют угол астрономической рефракции (т.е. в условиях, когда объект наблюдения удален на бесконечность). Поэтому для объектов, отстоящих от точки наблюдения на конечное расстояние, угол рефракции будет определен с ошибкой.

В настоящей работе обе этих погрешности были исследованы в зависимости от видимого зенитного угла цели Z_0 и высоты h цели над Землей. Зависимость показателя преломления n от высоты была выбрана согласно стандартной атмосфере ГОСТ 4401-81. Интегралы (1) – (3) определялись численным методом, разработанным в [9], так как на больших зенитных углах обычные методы численного интегрирования для их вычисления использовать нельзя [9]. Угол рефракции вычислялся исходя из геометрии задачи, причем, угол Φ_s (полярная координата объекта) определялся из (3), а радиус Земли считался известным.

В табл. 1 приведены результаты вычислений ΔD (в см), а в табл. 2 – угла рефракции α (в угловых секундах) для нескольких значений зенитного угла и высоты объекта (значение $h=20000$ км выбрано не случайно, это средняя высота ИСЗ, обеспечивающих глобальные спутниковые радионавигационные системы). Видно, что высота наблюдаемого объекта над Землей влияет на величину рефракционных поправок, особенно на больших зенитных углах. Например, на 80° отличие величины искривления траектории луча от его значений, определенных при высоте объекта $h=100$ км, превышает 0,5 см для $h=20000$ км, а вблизи 90° эта величина может составлять сотни сантиметров. Аналогичные закономерности проявляются и при анализе углов рефракции в случае наблюдений космических объектов.

Таблица 1

$Z_0, ^\circ$ $h, \text{ км}$	30	70	80	90
100	0,006	0,357	2,726	698,21
1000	0,007	0,413	3,173	882,51
10000	0,008	0,421	3,248	947,03
20000	0,008	0,421	3,256	955,82
10^8	0,008	0,422	3,267	968,49

Таблица 2

$Z_0, ^\circ$ $h, \text{ км}$	30	70	80	90
100	34,81	163,93	328,01	2241,6
1000	37,38	176,14	353,59	2539,7
10000	37,64	177,68	357,89	2644,1
20000	37,66	177,81	358,35	2658,3
10^8	37,67	177,98	358,95	2678,8

Для учета конечной высоты космического объекта при определении рефракционных поправок приближенными методами предлагается использовать следующий довольно простой способ. Очевидно, что в случае, когда пределы интегрирования в (1) – (3) находятся выше верхней границы земной атмосферы, интегралы (1) – (3) становятся табличными. Если высота цели известна хотя бы приближенно (например, из необработанных результатов измерений, в которые и вводятся обсуждаемые поправки), то из (1) – (3) несложно получить алгебраические выражения, уточняющие рефракционные поправки с учетом определенного значения высоты объекта.

Таким образом, в работе проанализировано влияние высоты объекта наблюдения на точность приближенных методов определения рефракционных поправок как функций видимого зенитного угла при координатных измерениях на трансатмосферных трассах. Показано, что погрешность этих методов становится существенной при больших зенитных углах наблюдения. Предложен метод коррекции результатов определения рефракционных поправок.

Список литературы: 1. *Marini J.W. and Murray C.W.* Correction of laser range tracking data for atmospheric refraction at elevations above 10 degrees.// NASA-TM-X-70555, Coddard Space Flight Center, Greenbelt, Md. 1973. 2. *Davis J.L, Herring T.A., Shapiro I.I., Rogers A.E.E. and Elgered G.* Geodesy by radiointerferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length.// Radioscience. 1985. Vol. 20. No. 6. P.1593-1607. 3. *Herring T.A.* Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data//. Proceedings of Symposium of Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, J.C. de Munk and T.A. Th. Spoelstra (Eds.), The Hague, The Netherlands, 19-22 May, Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, Delft, The Netherlands, No. 36, New Series. – 1992. P. 157-164. 4. *Niell A.E.* Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths.// Journal of Geophysical Research. 1996. Vol. 101, No. B2, P. 3227-3246. 5. *Mendes V.B.* Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques// Ph. D. dissertation. Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No.199. University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1999, 353 p. 6. *Saastamoinen J.* Contributions to the theory of atmospheric refraction. In three parts.// Bulletin Geodesique. 1973. No. 105. P.279-298; No. 106. P. 383-397; No. 107. P. 13-34. 7. Таблицы рефракции Пулковской обсерватории. Изд. 5; Под ред. В.К.Абалакина. Л.: Наука, 1985. 48 с. 8. *Алексеев А.В. и др.* Оптическая рефракция в земной атмосфере (наклонные трассы). Новосибирск: Наука, 1983. 230 с. 9. *Прокопов А.В., Ремаева О.А., Снурникова Г.К.* Определение атмосферных поправок к результатам лазерных измерений расстояний до ИСЗ методами численного интегрирования// Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2001. Вып. 117. С. 31-34.

Харьковский национальный

Поступила в редколлегию 11.04.2002

университет радиоэлектроники

Харьковский государственный научно-

исследовательский институт метрологии

Харьковский государственный

экономический университет