

УДК 621.371:389

А.В. Прокопов

*Национальный научный центр «Институт метрологии», Харьков, Украина*

## ВЛИЯНИЕ СИСТЕМНЫХ РЕФРАКЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ТРАНСАТМОСФЕРНЫХ ТРАССАХ

*Анализируется системное влияние эффектов рефракции на результаты измерений, осуществляемых с помощью электромагнитных волн, прошедших тропосферу и ионосферу Земли. Обсуждается роль этих эффектов в формировании погрешности (неопределенности) измерений для таких приложений как: глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), двухсторонняя передача сигналов времени и частоты через ИСЗ (TWSTFT), передача сигналов с помощью микроволновой линии в космическом эксперименте ACES. Приведены формулы для количественных оценок поправок, предназначенных для компенсации рассматриваемых эффектов.*

**Ключевые слова:** погрешность измерений, неопределенность измерений, тропосфера, ионосфера, рефракция, электромагнитные волны, системные эффекты.

### Введение

**Постановка проблемы, анализ последних достижений и публикаций.** Электромагнитные волны уже давно стали одним из важнейших элементов измерительных технологий, широко применяемых в разнообразных технических приложениях на Земле и в Космосе. Так, измерения временной задержки электромагнитных волн (радиосигналов), распространяющихся между специальной аппаратурой, установленной на искусственных спутниках Земли (ИСЗ), и аппаратурой наземных наблюдателей, лежат в основе функционирования глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [1]. Эти системы приобретают все большую популярность и осваиваются во многих странах мира. Уже созданы и внедрены такие системы в США (GPS) и России (ГЛОНАСС), в заключительной стадии разработки находятся европейская система Galileo и китайская Beidou [2,3], большое внимание уделяется подобным системам в Японии, Индии и в других странах [4].

Среди внешних факторов, оказывающих существенное влияние на точность измерений, выполняемых с помощью ГНСС, важное место занимает воздействие неоднородной земной атмосферы (а именно, двух ее основных областей – тропосферы и ионосферы) на характеристики распространения

электромагнитной волны, которое сказывается на измеряемом времени задержки радиосигнала на трассе измерений. К погрешности в общем случае приводят дополнительные задержки, обусловленные отличием скорости распространения электромагнитной волны в неоднородной атмосфере от скорости ее распространения в вакууме и рефракционным искривлением (удлинением) траектории, по которой распространяется волна [1-4]. Аналогичные эффекты являются источником погрешности измерений и в оптическом диапазоне, например, при лазерных измерениях расстояний до Луны методами лазерной дальнометрии [5].

Методы коррекции влияния неоднородной атмосферы, которые в настоящее время применяются в практике ГНСС измерений, основываются на предположении о том, что эффекты, обусловленные тропосферой и ионосферой, являются независимыми и могут рассматриваться по отдельности. Подробная информация о методах атмосферной коррекции результатов ГНСС измерений в рамках данного подхода представлена в большом количестве публикаций, в том числе, в цитированных выше монографиях [1 – 3].

Вместе с тем, наблюдаемый в последние годы рост требований к точности ГНСС измерений стимулировал большое количество исследований, посвященных учету так называемых рефракционных

эффектов высших порядков, влияющих на формирование разности задержек сигналов двух частот в неоднородной ионосфере в рамках двухчастотного метода ГНСС измерений (используемого для аппаратной коррекции ионосферной задержки) [6]. Вклад этих эффектов (связанных с учетом слагаемых высших порядков малости в разложении коэффициента преломления ионосферы по обратным степеням частоты и с рефракционным пространственным разбросом траекторий электромагнитных волн с различными частотами в неоднородной ионосфере) в ионосферную задержку примерно на два порядка меньше обычно учитываемого основного эффекта. Тем не менее, в ряде приложений данные эффекты оказываются весьма существенными.

Следует подчеркнуть, что учет этих эффектов необходим не только в случае высокоточных ГНСС измерений, но и для таких новых вариантов использования электромагнитных волн, как передача сигналов точного времени или синхронизация пространственно удаленных часов методом двухсторонней передачи сигналов времени и частоты через ИСЗ (известным как метод TWSTFT [7]), использование микроволновой линии связи с целью синхронизации часов (стандартов частоты) на Земле и в космосе в рамках готовящегося международного эксперимента ACES [8] и др. В рассматриваемых примерах также используется принцип измерений на двух частотах с целью исключения фактора ионосферной задержки.

Таким образом, попытки учета рефракционных ионосферных эффектов высших порядков говорят о стремлении к повышению точности. Справедлив ли будет с учетом более жестких требований к точности используемый в настоящее время подход, опирающийся на предположение о независимости вкладов тропосферы и ионосферы в задержку сигнала? Этот вопрос уже поднимался в литературе. В ряде работ [9-11] показано, что данный подход является упрощенным и не отражает действительную физическую картину рефракции в такой сложной преломляющей среде как неоднородная атмосфера Земли. В связи с наличием двух разнесенных в пространстве неоднородных областей – тропосферы и ионосферы (являющихся аналогом системы из двух преломляющих линз), пространственное положение траектории электромагнитной волны (сигнала) в тропосфере определяется не только рефракцией в тропосфере, но и рефракцией в ионосфере. Аналогично положение траектории сигнала в ионосфере зависит не только от ионосферной, но и от тропосферной рефракции. Вследствие этого времена задержки сигнала в каждой из данных неоднородных сред, описываемые интегралами вдоль траектории с подынтегральной функцией, зависящей от свойств среды распространения в точках прохождения траектории, будут определяться

совокупностью рефракционных процессов, происходящих как в тропосфере, так и в ионосфере. Таким образом, в общем случае при решении задачи коррекции необходимо использовать системный подход, учитывающий одновременно рефракцию и в тропосфере, и в ионосфере. Отметим, что в результате оцененная атмосферная задержка окажется не просто суммой задержек в тропосфере и ионосфере, найденных в результате их независимой оценки, а должна получить сверхсуммарную по сравнению с данной величиной составляющую [9, 10].

**Формулирование цели статьи.** Целью настоящей работы является анализ результатов моделирования системного вклада в атмосферную задержку для двух основных вариантов, реализующихся в рассматриваемых примерах измерений, осуществляемых с помощью электромагнитных волн, прошедших тропосферу и ионосферу Земли. Первый вариант соответствует измерениям, осуществляемым на одной несущей частоте, второй – двухчастотным измерениям (двухчастотный метод, как известно, использует зависимость показателя преломления ионосферы от частоты и предназначен для аппаратного исключения ионосферной задержки во всех вариантах использования электромагнитных волн [1 – 8]). Далее будут приведены как общие соотношения для расчета дополнительных (сверхсуммарных) задержек сигнала для каждого из указанных вариантов, так и конкретные упрощенные соотношения для их количественной оценки. Эти соотношения являются поправками к модельным уравнениям для оценивания неопределенности измерений задержек сигналов.

## Изложение основного материала

**Системный эффект в случае одночастотных измерений.** Общие соотношения для точного (в рамках геометрической оптики) расчета поправки  $\Delta P_{\text{совм}}$  к времени задержки одночастотного сигнала (или для погрешности определения задержки сигнала – если данная поправка не вводится в результаты измерений), обусловленной совместным воздействием тропосферы и ионосферы на время распространения сигнала, приведены в [9-10]:

$$\Delta P_{\text{совм}} = (\Delta P_{\Sigma \text{троп}} + \Delta P_{\Sigma \text{ион}}) - (\Delta P_{\text{троп}} + \Delta P_{\text{ион}}), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{где} \quad \Delta P_{\Sigma \text{троп}} + \Delta P_{\Sigma \text{ион}} &= \int_{\sigma_{\Sigma}} (n_{\Sigma} - 1) d\sigma = \\ &= \int_{\sigma_{\Sigma}} (n_{\text{троп}} - 1) d\sigma + \int_{\sigma_{\Sigma}} (n_{\text{ион}} - 1) d\sigma - \end{aligned}$$

полная задержка сигнала при совместном влиянии тропосферы и ионосферы на эффект рефракции; тропосфера и ионосфера рассматриваются как единая среда с показателем преломления

$$n_{\Sigma} = 1 + (n_{\text{троп}} - 1) + (n_{\text{ион}} - 1)$$

(здесь  $n_{\text{троп}}$ ,  $n_{\text{ион}}$  – соответственно показатели преломления тропосферы и ионосферы, соотношения для них приводятся в многочисленной литературе [1-3,5,6], а форма траектории сигнала  $\sigma_{\Sigma}$ , вдоль которой осуществляется интегрирование, определена совместным влиянием тропосферы и ионосферы);

$$\Delta P_{\text{троп}} = \int_{\sigma_{\text{троп}}} (n_{\text{троп}} - 1) d\sigma - \text{задержка сигнала в}$$

тропосфере, определенная в предположении отсутствия влияния ионосферы (когда полагается  $n_{\text{ион}} = 1$  и форма траектории  $\sigma_{\text{троп}}$ , задающая путь интегрирования, определена лишь рефракцией в тропосфере);

$$\Delta P_{\text{ион}} = \int_{\sigma_{\text{ион}}} (n_{\text{ион}} - 1) d\sigma - \text{задержка сигнала в ионосфере, определенная в предположении, что тропосфера не влияет на распространение сигнала (когда принимается } n_{\text{троп}} = 1 \text{ и форма траектории } \sigma_{\text{ион}}, \text{ описывающая путь интегрирования, определена только рефракцией в ионосфере).}$$

Аналогичные соотношения могут быть выписаны и для удлинения траектории  $\delta r_*$ :

$$\delta r_* = \int_{\sigma_*} d\sigma - L,$$

где интеграл берется вдоль соответствующей траектории  $\sigma_*$  с подынтегральной функцией, равной 1,  $L$  - длина прямой, соединяющей концевые точки траектории (знак \* соответствует индексам троп, ион, либо  $\Sigma$ ).

**Системный эффект в случае двухчастотных измерений.** Точные формулы для расчета поправки, обусловленной совместным воздействием тропосферы и ионосферы, в случае сигнала состоящего из двух монохроматических электромагнитных волн с частотами  $f_1$  и  $f_2$  можно представить следующим образом [9]:

$$\delta \Sigma_{\text{совм}} = \delta \Sigma_{\text{троп+ион}} - \delta \Sigma_{\text{ион}}, \quad (2)$$

$$\text{где } \delta \Sigma = -\delta \rho_1 + \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(\delta \rho_2 - \delta \rho_1) + (\Delta P_{\text{троп},2} - \Delta P_{\text{троп},1}) + (\Delta P_{\text{ион},2} - \frac{f_1^2}{f_2^2} \Delta P_{\text{ион},1})], \quad (3)$$

а обозначения соответствуют (с учетом различий в индексах) пояснению к формуле (1), индексы 1,2 относятся к величинам, определенным для  $f_1$  и  $f_2$ , соответственно; уменьшаемое в правой части формулы (2) содержит величины, рассчитанные по формуле (3) для траекторий, сформированных под воздействием рефракции и в тропосфере, и в ионосфере, а вычитаемое – для траекторий, учитывающих рефракцию только в ионосфере.

Для расчета поправок по формулам (1)-(3), который может быть выполнен методами численного интегрирования, в общем случае необходимо знать пространственные профили показателя преломления тропосферы и ионосферы. Приближенную количественную оценку этих поправок можно получить, если воспользоваться известным представлением [5] формул для составляющих задержки в виде произведения зенитной задержки (задержки сигнала при его распространении в зенитном направлении) на функцию отображения (функцию, описывающую зависимость задержки от зенитного угла, т.е. угла, определяющего направление распространения сигнала). В самом деле, представим  $\Delta P$  (где под  $\Delta P$  понимается тропосферная либо ионосферная задержка с учетом либо без учета совместного влияния рефракции в двух неоднородных средах) в виде

$$\Delta P = \Delta P^{\text{zen}} \cdot m(z), \quad (4)$$

где  $\Delta P^{\text{zen}}$  - зенитная задержка;  $m(z)$  - функция отображения;  $z$  - зенитный угол.

Зенитный угол может быть представлен [12] в виде  $z = z_0 + \alpha$ , где  $z_0$  - истинный зенитный угол (соответствующий направлению на источник сигнала по прямой линии, без учета рефракции в неоднородной атмосфере),  $\alpha$  - угол рефракции, который равен  $\alpha_{\text{троп}}$  (учитывается рефракция только в тропосфере),  $\alpha_{\text{ион}}$  (учитывается рефракция только в ионосфере), либо  $\alpha_{\text{троп}} + \alpha_{\text{ион}}$  (учитывается рефракция и в тропосфере, и в ионосфере).

Рассмотрим область зенитных углов вблизи  $Z_0 = 80^\circ$ . Учитывая, что в данном случае  $Z_0 \gg \alpha$ , разложим  $m(z)$  в ряд по степеням  $\alpha$ , ограничиваясь линейным по  $\alpha$  приближением. Подставляя затем (4) в (1), получим для случая тропосферной задержки, следующее соотношение

$$\Delta P_{\Sigma \text{троп}} - \Delta P_{\text{троп}} \approx \Delta P_{\text{троп}} \frac{\partial \ln m}{\partial z} \cdot \alpha_{\text{ион}},$$

определяющее дополнительную составляющую тропосферной задержки, обусловленную системным эффектом влияния рефракции в ионосфере на рефракцию в тропосфере. Для наиболее распространенной функции отображения  $m(z) = \cos^{-1} z$  [5] при  $z = 80^\circ$ , имеем  $\frac{\partial \ln m}{\partial z} = \text{tg} z \approx 5,7$ . Тропосферная задержка для  $z = 80^\circ$  приближается к  $\Delta P_{\text{троп}} \approx 13$  м [5], а угол ионосферной рефракции (для частот, характерных для системы GPS) принимает значения около  $10''$  [13]. При этом пренебрежение системным эффектом приводит к погрешности около 4 мм, что необходимо учитывать при современных требованиях к точности измерений для рассматриваемых применений электромагнитных волн. Более строгие

расчеты [10,11], выполненные методами численного интегрирования с использованием современных моделей атмосферы подтверждают данную оценку (системная составляющая погрешности в диапазоне зенитных углов  $80^{\circ} \dots 90^{\circ}$  может находиться в диапазоне от нескольких миллиметров до нескольких десятков сантиметров).

## Выводы

Выполнен анализ влияния системных рефракционных эффектов на результаты измерений, осуществляемых с помощью электромагнитных волн, прошедших тропосферу и ионосферу Земли. Рассмотрена роль этих эффектов в формировании погрешности (неопределенности) измерений для таких приложений как: глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), двухсторонняя передача сигналов времени и частоты через ИСЗ (TWSTFT), передача сигналов с помощью микроволновой линии в космическом эксперименте ACES. Приведены формулы для количественных оценок поправок, предназначенных для компенсации рассматриваемых эффектов. Эти формулы являются поправками к модельным уравнениям для оценивания неопределенности измерений задержек сигналов. Показано, что их учет необходим в случае измерений, осуществляемых на больших зенитных углах.

## Список литературы

1. Гофманн-Велленгоф Б. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика. / Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Р., Коллінз Д. – К.: Наук. думка, 1995 – 380 с.
2. El-Rabbany A. Introduction to GPS: The Global Positioning System. Artech House, Inc., 2002. -194 pp. // Электронный ресурс: <http://www.twirpx.com/file/334342/>.
3. Kaplan D.E., Hegarty C.J. Understanding GPS. Principles and Applications. Second Edition, Artech House, Inc., 2006. - 723p. – <http://www.twirpx.com/file/859590/>.
4. Электронный ресурс: <http://www.insidegnss.com/>.
5. Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy // Proceedings of the Symposium, The Hague, The Netherlands, May 19 - 22, 1992.
6. Elizabeth J. Petrie, Manuel Hernandez-Pajares, Paolo Spalla, a.a. A Review of Higher Order Ionospheric Refraction Effects on Dual Frequency GPS // Surv. Geophys.-2011.- v. 32.- pp. 197-253.
7. Michito Imae. Review of Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer // Journal of Metrology Society of India.- 2006.- Vol. 21.- No. 4.- P. 243-248.
8. Atomic clock ensemble in space (ACES)// Электронный ресурс: [http://www.esa.int/our\\_activities/human\\_spaceflight/human\\_spaceflight\\_research/atomic\\_clock\\_ensemble\\_in\\_space\\_ACES](http://www.esa.int/our_activities/human_spaceflight/human_spaceflight_research/atomic_clock_ensemble_in_space_ACES).
9. Прокопов А.В. Учет системных эффектов при оценке влияния земной атмосферы на результаты ГНСС измерений / А.В. Прокопов // Системи обробки інформації. – X.: ХУИС, 2010. – Вип. 4 (85). – С. 104-107.
10. Совместное влияние тропосферы и ионосферы Земли на точность фазовых измерений, осуществляемых с помощью ГНСС / Горб А.И., Прокопов А.В., Ремаев Е.В., Ремаева О.А. // Український метрологічний журнал. – 2006. – № 3. – С. 19-22.
11. Олейник А.Е. Поправки, учитывающие ионосферные эффекты высших порядков при двухчастотных ГНСС-измерениях / А.Е. Олейник, А.В. Прокопов // Український метрологічний журнал. – 2007. – №. 3. – С. 58-61.
12. Колосов М.А. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса / М.А. Колосов, А.В. Шабельников. –М.: Сов. радио, 1976. – 220 с.
13. Колосов М.А. Распространение радиоволн при космической связи / М.А. Колосов, Н.А. Арманд, И.И. Яковлев. – М.: Связь, 1969. – 156 с.

Поступила в редакцию 4.04.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники.

## ВПЛИВ СИСТЕМНИХ РЕФРАКЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ НА РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ, ЩО ЗДІЙСНЮЮТЬСЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ НА ТРАНСАТМОСФЕРНИХ ТРАСАХ

О.В. Прокопов

Аналізується системний вплив ефектів рефракції на результати вимірювань, здійснюваних за допомогою електромагнітних хвиль, що проходять тропосферу і іоносферу Землі. Обговорюється роль цих ефектів у формуванні похибки (невизначеності) вимірювань для таких застосувань як: глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС), двостороння передача сигналів часу і частоти через ІСЗ (TWSTFT), передача сигналів за допомогою мікрохвильової лінії в космічному експерименті ACES. Приведені формули для кількісних оцінок поправок, призначених для компенсації розглянутих ефектів.

**Ключові слова:** похибка вимірювань, невизначеність вимірювань, тропосфера, іоносфера, рефракція, електромагнітні хвилі, системні ефекти.

## THE INFLUENCE OF SYSTEM REFRACTION EFFECTS ON RESULTS OF MEASUREMENTS, CARRIED OUT BY ELECTROMAGNETIC WAVES ON TRANSATMOSPHERIC TRACES

A.V. Prokopov

The system influence of refraction effects on the results of measurements, carried out by electromagnetic waves passed the troposphere and ionosphere of Earth, is analyzed. The role of these effects in forming of error (uncertainty) of measurements for such applications as global satellite navigation systems (GNSS), two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT), transmission of signals by a microwave link in the space experiment of ACES, comes into question. Formulas for the quantitative estimations of corrections for compensation of the examined effects are presented.

**Keywords:** error of measurements, uncertainty of measurement, troposphere, ionosphere, refraction, electromagnetic waves, system effects.