

УДК 621.371:389

А.В. Прокопов

Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков, Украина

УЧЕТ СИСТЕМНЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ГНСС-ИЗМЕРЕНИЙ

Рассматривается влияние системных эффектов, обусловленных взаимным воздействием процессов рефракции электромагнитных волн в тропосфере и ионосфере Земли на результаты ГНСС-измерений. Приведены формулы для расчета соответствующих поправок, которые могут быть использованы для оценки неопределенности (погрешности) измерений, связанной с рассматриваемыми эффектами. Обсуждается возможность исключения влияния системных эффектов на основе использования методологии разностных измерений.

Ключевые слова: ГНСС, оценка влияния атмосферы, рефракция, системные эффекты, неопределенность измерений.

Введение

Постановка проблемы, анализ последних достижений и публикаций. Одним из основных факторов, ограничивающих точность измерений, осуществ-

ляемых с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), является влияние земной атмосферы на характеристики распространения электромагнитных волн (ЭМВ) сверхвысокочастотного диапазона, используемых при измерениях.

Источниками погрешности измерения в данном случае оказываются дополнительная временная задержка сигнала в атмосфере, обусловленная отличием скорости распространения сигнала от скорости света и рефракционным искривлением (удлинением) траектории, по которой он распространяется.

Главный вклад в атмосферную задержку дают две ее основные области: тропосфера – электрически нейтральный приземный слой атмосферы, высота которого не превышает 60...80 км, а также ионосфера – электрически заряженный слой, границы которого находятся вблизи высот 100 и 1000 км.

Практически применяемые в настоящее время методы коррекции результатов ГНСС-измерений, основываются на раздельном (независимом) рассмотрении задержек сигнала в тропосфере и ионосфере. Предполагается, что задержки могут быть скомпенсированы либо введением соответствующих поправок при обработке результатов измерений, либо аппаратным путем – с использованием измерительной информации, получаемой непосредственно при измерениях [1].

Данный подход является упрощенным и сильно загроубляет действительную физическую картину рефракции в такой сложной преломляющей среде как атмосфера Земли. Наличие двух разнесенных в пространстве неоднородных областей – тропосферы и ионосферы (являющихся аналогом системы из двух преломляющих линз) приводит к тому, что пространственное положение траектории сигнала в тропосфере определяется не только рефракцией в тропосфере, но и рефракцией в ионосфере. Аналогично положение траектории в ионосфере зависит не только от ионосферной, но и от тропосферной рефракции. Вследствие этого времена задержки сигнала в каждой из данных сред определяются 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 задержка должна получить свержсуммарную составляющую (что и является отличительным признаком системного эффекта), связанную именно с одновременным влиянием тропосферы и ионосферы [2].

Целью настоящей работы является моделирование системного вклада в атмосферную задержку для двух основных вариантов ГНСС-измерений. 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 [1]). Далее будут приведены соотношения для расчета дополнительных (сверхсуммарных) задержек сигнала для каждого из указанных вариантов.

Изложение основного материала

Системный эффект в случае одночастотных измерений. Рассмотрим сначала модель дополнительной задержки для случая одночастотных измерений. Исходные соотношения для количественной оценки поправки к времени задержки сигнала $\Delta S_{\text{совм}}$ (или для погрешности определения задержки сигнала – если данная поправка не вводится в результаты измерений), обусловленной совместным воздействием тропосферы и ионосферы на время распространения сигнала, в общем случае можно представить следующим образом [2]

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

где $\Delta P_{\Sigma} = \int_{\sigma_{\Sigma}} (n_{\Sigma} - 1) d\sigma$ – полная задержка сигнала с

учетом совместного влияния на эффект рефракции как тропосферы, так и ионосферы, которые считаются единой средой 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, а форма траектории сигнала σ_{Σ} , вдоль которой осуществляется интегрирование, определена совместным влиянием тропосферы и ионосферы);

$\Delta P_{\text{троп}} = \int_{\sigma_{\text{троп}}} (n_{\text{троп}} - 1) d\sigma$ – 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);

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

сфере, определенная в предположении, что тропосфера не влияет на распространение сигнала (когда принимается $n_{\text{троп}} = 1$ и форма траектории $\sigma_{\text{ион}}$, то есть путь интегрирования, определена только рефракцией в ионосфере). Аналогичные соотношения могут быть выписаны и для удлинения траектории

δr : $\delta r = \int_{\sigma_*} d\sigma - L$, где интеграл берется вдоль соот-

ветствующей траектории σ_* с подынтегральной функцией, равной 1, L – длина прямой, соединяющей концевые точки траектории).

Вышеприведенные интегралы для ΔP и δr , определяющие задержку сигнала, рассчитывались для случая сферически слоистой среды с использованием стандартного профиля тропосферы ГОСТ 4401-81 и известной модели ионосферы Чепмена [2]. Показано, что для обычных ионосферных условий эффект неучета совместного рефракционного влияния тропосферы и ионосферы может быть заметным на больших зенитных углах ИСЗ. В условиях повышен-

ной солнечной активности влияние этого эффекта становится более существенным и растет пропорционально концентрации электронов в ионосфере. Так, для максимальной электронной концентрации $N_m = 5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, и частоте сигнала $f_1 = 1227,60 \text{ МГц}$ величина $\Delta P_{\text{совм}}$ изменяется от 1 до 30 см с изменением зенитного угла от 80 до 90°.

Системный эффект в случае двухчастотных измерений. Обоснование точных уравнений для поправок. Сформулируем теперь модель для учета системного рефракционного эффекта при двухчастотных ГНСС-измерениях. При рассмотрении данной задачи необходимо учитывать и так называемые ионосферные рефракционные эффекты высших порядков [3 – 6], которые считались несущественными при выводе используемого на практике уравнения измерения двухчастотного метода.

В качестве исходной системы уравнений, необходимой для вывода уравнения измерения двухчастотного метода в рамках системного подхода с поправками, учитывающими рефракционные ионосферные эффекты высших порядков, будем использовать следующие уравнения. Прежде всего, это соотношения для псевдодальностей P_i на частотах f_i , которые мы представим в виде [1]

$$P_i = \rho_i + \Delta P_{\text{троп},i} + \Delta P_{\text{ион},i}, \quad i = 1, 2, \quad (2)$$

где ρ_i – геометрическая дальность для частоты f_i , определяемая соотношением $\rho_i = \int_{\sigma(f_i)} d\sigma$, причем

интегрирование здесь и далее для каждой из частот осуществляется по своим траекториям – $\sigma(f_1)$ и $\sigma(f_2)$ соответственно.

Очевидно, что величина $\Delta P_i = P_i - \rho_i$ представляет собой полную атмосферную задержку на частоте f_i и определяется суммарным вкладом задержек в тропосфере $\Delta P_{\text{троп},i}$ и в ионосфере $\Delta P_{\text{ион},i}$

$$\Delta P_{\text{троп},i} = \int_{\sigma(f_i)} (n_{\text{троп}} - 1) d\sigma, \quad i = 1, 2; \quad (3)$$

$$\Delta P_{\text{ион},i} = \int_{\sigma(f_i)} (n_{\text{ион},i} - 1) d\sigma, \quad i = 1, 2, \quad (4)$$

где $n_{\text{троп}}$, $n_{\text{ион},i}$ – соответственно показатель преломления воздуха и коэффициент преломления ионосферы для частоты f_i в текущей точке траектории сигнала. Формула для $n_{\text{ион},i}$ (например, в обозначениях [3]) имеет вид:

$$n_{\text{ион},i} = 1 - \frac{\alpha}{f_i^2} N_e - \frac{\beta}{f_i^3} N_e H \cos \theta - \frac{\gamma}{f_i^4} N_e^2 - R_i, \quad (5)$$

где N_e – концентрация электронов; θ – угол между вектором напряженности магнитного поля H и направлением распространения сигнала; $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ –

множители, пропорциональные f^{-2} , f^{-3} , f^{-4} , соответственно; R_i – остаточный член разложения в ряд по обратным степеням частоты соотношения для коэффициента преломления ионосферы.

Поскольку траектории $\sigma(f_1)$ и $\sigma(f_2)$ не совпадают, то тропосферные задержки на частотах f_1 и f_2 различаются, т.е. $\Delta P_{\text{троп},1} \neq \Delta P_{\text{троп},2}$. Далее

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{ион},i} = \rho_i - \frac{\alpha}{f_i^2} \int_{\sigma(f_i)} N_e d\sigma - \frac{\beta}{f_i^3} \int_{\sigma(f_i)} N_e H \cos \theta d\sigma - \\ - \frac{\gamma}{f_i^4} \int_{\sigma(f_i)} N_e^2 d\sigma - \int_{\sigma(f_i)} R_i d\sigma. \end{aligned} \quad (6)$$

Введем удлинение траекторий вследствие рефракции в неоднородной среде:

$$\delta \rho_i = \rho_i - L, \quad i = 1, 2, \quad (7)$$

где L – истинное расстояние между источником сигнала и приемником по прямой линии, и обозначим

$$\Delta P_{21} = P_2 - P_1. \quad (8)$$

Выбирая для определенности в качестве основной частоты частоту f_1 , представим уравнение (2) в виде, выражающем искомое расстояние L через измеренную псевдодальность P_1 , поправку за искривление траектории $\delta \rho_1$ и полную атмосферную задержку $\Delta P_{\text{троп},1} + \Delta P_{\text{ион},1}$:

$$L = P_1 - \delta \rho_1 - \Delta P_{\text{троп},1} - \Delta P_{\text{ион},1}. \quad (9)$$

Путем тождественных преобразований с использованием системы уравнений (2) – (9) получим из (9) следующее соотношение:

$$L = P_1 - \Delta P_{\text{троп},1} - \frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \Delta P_{21} + \delta \Sigma, \quad (10)$$

где первые два слагаемых в правой части соответствуют уравнению измерения классического двухчастотного метода, реализующего так называемую без-ионосферную комбинацию; $\delta \Sigma$ – суммарная поправка, учитывающая рефракционное удлинение $\delta \rho_1$ на основной частоте f_1 , системный эффект (для которого все величины, входящие в (10), должны быть определены вдоль траекторий, сформированных в результате одновременного рефракционного воздействия тропосферы и ионосферы) и все эффекты высших порядков, о которых говорилось выше. Существенно подчеркнуть, что формула (10) учитывает все члены разложения в (5) и все системные эффекты (является точной), поэтому строгую формулу для поправки $\delta \Sigma$ можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta \Sigma = -\delta \rho_1 + \left(\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \cdot [(\delta \rho_2 - \delta \rho_1) + \\ + (\Delta P_{\text{троп},2} - \Delta P_{\text{троп},1}) + \left(\frac{\Delta P_{\text{ион},2}}{f_1^2 / f_2^2} - \Delta P_{\text{ион},1} \right)]. \end{aligned} \quad (11)$$

В (11) первое слагаемое в правой части определяет поправку за удлинение траектории сигнала на основной частоте, второе слагаемое – поправку за эффекты высших порядков.

Оценки, проведенные в работе [5], показывают, что на углах места около 10° в зависимости от угла между направлением геомагнитного поля и направлением распространения электромагнитной волны величина δ_Σ изменяется от 3 см до 8 см для кодовых ГНСС-измерений и от -2 см до -5 см для фазовых измерений. В то же время требования к точности измерений для многих важных приложений ограничены величинами, не превышающими единиц миллиметров [1]. Для корректного учета системного рефракционного эффекта обе траектории, вдоль которых берутся интегралы при вычислении поправок, должны формироваться при одновременном рефракционном воздействии тропосферы и ионосферы. Из вышесказанного следует, что искомый системный эффект, то есть поправка, обусловленная совместным воздействием рефракции в тропосфере и ионосфере, определяется разностью поправок δ_Σ , вычисляемой по формуле

$$\delta_{\Sigma\text{совм}} = \delta_{\Sigma\text{trop} + \text{ion}} - \delta_{\Sigma\text{ion}}, \quad (12)$$

где уменьшаемое содержит величины, рассчитанные по формуле (11) для траекторий, сформированных под воздействием рефракции и в тропосфере, и в ионосфере, а вычитаемое – для траекторий, учитывающих рефракцию только в ионосфере.

Выводы

Полученные в статье точные формулы (1), (11), (12) могут использоваться для вычисления поправок к результатам ГНСС-измерений с использованием задержек сигналов и удлинения их траекторий на соответствующих частотах.

Если поправки не вводятся, то эти формулы дают возможность оценить составляющую погрешности (неопределенности) результатов измерений, обусловленную неучетом системных эффектов. При этом, для оценки неопределенности может быть использована изложенная в [6] методика, опирающаяся на известные рекомендации [7].

Для существенного уменьшения составляющей неопределенности результатов измерения, обусловленной влиянием системных эффектов (в тех случаях, когда компенсирующие поправки не вводятся), может быть использован метод разностных измерений [1]. А именно тот его вариант, при котором результат измерений представляется в виде разности результатов наблюдений одного ГНСС-спутника двумя наземными приемниками, расположенными в точках с различными координатами.

Список литературы

1. Гофманн-Велленгоф Б. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика / Б. Гофманн-Велленгоф, Р. Ліхтенеггер, Д. Коллінз; пер. з англ. третього вид. під ред. Я.С. Яцківа. – К.: Наук. думка, 1995. – 380 с.
2. Совместное влияние тропосферы и ионосферы Земли на точность фазовых измерений, осуществляемых с помощью ГНСС / А.И. Горб, А.В. Прокопов, Е.В. Ремаев, О.А. Ремаева // Український метрологічний журнал. – 2006. – Вип. 3. – С. 19-22.
3. Gu M. An improved model for the dual frequency ionospheric correction of GPS observations / M. Gu, F.K. Brunner // Manuscripta geodetica. – 1991, Springer-Verlag. – P. 205-214.
4. Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates / M. Fritsche, R. Dietrich, C. Knofel, A. Rulke, S. Vey, M. Rothacher, P. Steigenberger // Geophys. Res. Letters, Vol. 32, L 23311, doi:10.1029/2005GL024342. – 2005.
5. Олейник А.Е. Поправки, учитывающие ионосферные эффекты высших порядков при двухчастотных ГНСС-измерениях / А.Е. Олейник, А.В. Прокопов // Український метрологічний журнал. – 2007. – Вип. 3. – С. 58-61.
6. Олейник А.Е. Оценка неопределенности по типу В методов учета влияния ионосферы на результаты двухчастотных ГНСС-измерений / А.Е. Олейник, А.В. Прокопов // Український метрологічний журнал. – 2007. – Вип. 2. – С. 15-18.
7. Руководство по выражению неопределенности измерения / Пер. с англ. под науч. ред. В.А. Слава. – СПб.: НПО «ВНИИМ» им. Д.И.Менделеева, 1999. – 126 с.

Поступила в редколлегию 27.04.2010

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

ВРАХУВАННЯ СИСТЕМНИХ ЕФЕКТІВ ПРИ ОЦІНЦІ ВПЛИВУ ЗЕМНОЇ АТМОСФЕРИ НА РЕЗУЛЬТАТИ ГНСС-ВИМІРЮВАНЬ

О.В. Прокопов

Розглядається вплив системних ефектів, обумовлених взаємною дією процесів рефракції електромагнітних хвиль в тропосфері і іоносфері Землі, на результати ГНСС-вимірювань. Приведені формули для розрахунку відповідних поправок, які можуть бути використані для оцінки невизначеності (похибки) вимірювань, пов'язаної з даними ефектами. Обговорюється можливість виключення впливу системних ефектів на основі використання методології різницевої вимірювань.

Ключові слова: ГНСС, оцінка впливу атмосфери, рефракція, системні ефекти, невизначеність вимірювань.

THE SYSTEMS EFFECTS ACCOUNTING IN ASSESSING AT ESTIMATION OF SNFLUENCT THE EARTH ATMOSPHERE ON RESULTS OF GNSS-MEASUREMENTS

A.V. Prokopov

The mutual influence of the system effects, connected with refraction of electromagnetic waves in troposphere and ionosphere of Earth, on the results of GNSS-measurements is analyzed. Formulas for the calculation of the proper corrections, which can be used for the estimation of uncertainties (errors) of measurements related to the examined effects, are presented. Possibility of exception of influencing systems effects on the basis of methodology of the differential measurements comes into question.

Keywords: GNSS, assessing the impact of atmospheric refraction, systems effects, the uncertainty of measurement.