

ОЦЕНИВАНИЕ ВЕЛИЧИН ЗЕНИТНЫХ ТРОПОСФЕРНЫХ ЗАДЕРЖЕК ПО ИНФОРМАЦИИ БАЗОВЫХ ГНСС-СТАНЦИЙ

А.М. ЛУКЬЯНОВ, Е.В. ГРИНЧЕНКО, О.А. ЛУКЬЯНОВА, М.Н. ГАЛЕВИЧ

Рассматриваются алгоритмы определения величин зенитных тропосферных задержек по информации сети базовых ГНСС-станций, проводится их обоснование. Приводятся результаты экспериментальной проверки эффективности предложенных алгоритмов.

Ключевые слова: тропосферная задержка, ГНСС, базовая станция, фазовая псевдодальность.

ВВЕДЕНИЕ

Наличие тропосферы приводит к задержкам сигналов, передаваемых навигационными спутниками, эквивалентным увеличению расстояний до спутников на величины от 2,4 до 20 м в зависимости от углов их возвышения над плоскостью горизонта.

Для оценки значений и компенсации тропосферных задержек сигналов за последние десятилетия разработано большое количество моделей. В настоящее время для учета тропосферных задержек наиболее применяемыми являются эмпирические модели, разработанные Saastamoinen [1] и Hopfield [2], и стандартная модель, представленная в MOPS [3].

Основной недостаток моделей Saastamoinen и Hopfield состоит в том, что они применимы только при наличии данных о параметрах тропосферы (температуре, давлении и влажности) непосредственно в месте расположения навигационного приёмника. Таким образом, данные алгоритмы могут использоваться для обработки спутниковой навигационной информации в непосредственной близости от метеостанций.

Использование данных моделей позволяет оценивать тропосферные задержки в зените с погрешностью на уровне примерно 1% величины (~2,5 см) для сухой составляющей задержки и 10–20% (4–8 см) – для влажной составляющей [4]. Таким образом, суммарная погрешность компенсации зенитной тропосферной задержки может составлять от 5 до 10 см. При малых углах возвышения спутника над горизонтом (порядка 10°) погрешность компенсации влияния тропосферы может достигать 25–50 см. Тем не менее, модели Saastamoinen и Hopfield в настоящее время являются наиболее точными инструментами для компенсации тропосферных задержек сигналов ГНСС.

Что касается модели MOPS, то она построена на основании эмпирических моделей поведения температуры, давления и влажности, учитывающих зависимость от широты точки проведения наблюдений и их сезонных вариаций. Естественно, при этом не учитываются суточные и погодные колебания параметров тропосферы. Для этой модели погрешность учета тропосферы в зените может достигать 19 см, при значениях RMS (Root Mean Squared) до 5,1 см [5, 6, 7]. Соответственно,

при малых углах возвышения предельная погрешность может достигать 90 см.

При реализации дифференциального метода навигации влияние неточности учёта тропосферы существенно снижается. Это проявляется при малом (до двадцати-тридцати километров) расстоянии и малой (десятки метров) разности высот между базовой станцией и мобильным приёмником. При невыполнении указанных условий необходимо учитывать пространственное распределение параметров тропосферы. Так, например, только разница в высотах мобильного приёмника и базовой станции порядка 100 м может привести к погрешности компенсации зенитной тропосферной задержки порядка 2,8 см, а при малых углах возвышения спутников погрешность компенсации тропосферы может достигать 14 см.

Таким образом, при решении задачи высокоточных координатных определений, осуществляемых, в частности, в спутниковой геодезии, необходимо иметь корректную информацию о параметрах локальной тропосферы в местах размещения приёмников навигационных сигналов. Отсутствие, как правило, в непосредственной близости от приёмников навигационных сигналов метеостанций не позволяет корректно компенсировать задержку навигационных сигналов в тропосфере и добиться высокой точности координатных определений.

В условиях отсутствия данных о реальных параметрах тропосферы становится актуальным оценивание тропосферных задержек с использованием избыточного набора измерительной информации перманентных базовых ГНСС-станций, располагаемых на границах территории, в пределах которой координатные определения осуществляются по сигналам ГНСС.

Далее рассматривается алгоритм, позволяющий оценить зенитные тропосферные задержки в местах расположения базовых ГНСС-станций только по измерительной их информации.

1. БАЗОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Решение задачи оценивания тропосферных задержек по сигналам спутниковых навигационных систем основывается на использовании фазовых псевдодальностей, измеренных двухчастотными приёмниками базовых станций.

Соответствующее уравнение измерения фазовой псевдодальности имеет вид:

$$\Phi_{L1(L2),i,j} = R_{i,j} - c \cdot (\Delta t_{L1(L2),i} - \Delta t_{L1(L2),j}^{SV}) - \Delta_{L1(L2),i,j}^{ion} + \delta_{L1(L2),i,j}^{mp} - \Delta n_{L1(L2),i,j} \cdot \lambda_{L1(L2)} + c \cdot (\Delta t_{rec,i} - \Delta t_{SV,j}) + \Delta_{i,j}^{tr} + \varepsilon_{L1(L2),i,j},$$

где $\Phi_{L1(L2),i,j} = \lambda_{L1(L2)} \cdot (n_{L1(L2),i,j} + \phi_{L1(L2),i,j})$ – значение фазовой псевдодальности, измеренное на несущей частоте L1 (L2);

$\phi_{L1(L2),i,j}$ – однозначно измеренная дробная часть фазы несущей на частоте L1 (L2);

$n_{L1(L2),i,j}$ – количество целых длин волн в псевдодальности, измеренной приемником сигналов ГНСС;

$\Delta n_{L1(L2),i,j}$ – погрешность оценивания количества целых длин волн в измеренной псевдодальности;

$R_{i,j} = \sqrt{(x_{rec,i} - X_{SV,j})^2 + (y_{rec,i} - Y_{SV,j})^2 + (z_{rec,i} - Z_{SV,j})^2}$ – геометрическое расстояние между приемником и спутником;

$\vec{x}_{rec,i} = (x_{rec,i}, y_{rec,i}, z_{rec,i})^T$ – вектор координат приемника навигационных сигналов;

$\vec{X}_{SV,j} = (X_{SV,j}, Y_{SV,j}, Z_{SV,j})^T$ – вектор координат навигационного спутника;

c – скорость света;

$\lambda_{L1(L2)} = \frac{c}{f_{L1(L2)}}$ – длина волны несущей, имеющей частоту $f_{L1(L2)}$;

$\Delta t_{L1(L2),i}$ – задержка сигнала на частоте L1 (L2) в канале приемника;

$\Delta t_{L1(L2),j}^{SV}$ – задержка сигнала на частоте L1 (L2) в передающем канале навигационного спутника;

$\Delta_{L1(L2),i,j}^{ion}$ – погрешность измерения псевдодальности, обусловленная влиянием ионосферы;

$\delta_{L1(L2),i,j}^{mp}$ – погрешность измерения псевдодальности, обусловленная многолучевым распространением сигнала;

$\Delta t_{rec,i}$ – расхождение шкалы времени приемника и единой системной шкалы времени;

$\Delta t_{SV,j}$ – расхождение шкалы времени спутника и единой системной шкалы времени;

$\Delta_{i,j}^{tr}$ – погрешность измерения псевдодальности, обусловленная влиянием тропосферы;

$\varepsilon_{L1(L2),i,j}$ – шумовая погрешность измерения псевдодальности;

i – идентификатор приемника навигационных сигналов;

j – идентификатор навигационного спутника.

Использование при решении задачи оценивания тропосферных задержек линейных комбинаций измеряемых параметров позволяет исключить из рассмотрения ряд параметров. Так, формирование свободной от влияния ионосферы комбинации (IF-комбинации: $\Phi_{i,j}^{if} = \frac{\Phi_{L1,i,j} - \gamma \cdot \Phi_{L2,i,j}}{1 - \gamma}$)

позволяет исключить не только погрешности из-

мерений, обусловленные влиянием ионосферы ($\Delta_{L1(L2),i,j}^{ion}$), а также и зависящие от частоты задержки сигналов в каналах приемника ($\Delta t_{L1(L2),i}$) и передающего устройства спутника ($\Delta t_{L1(L2),j}^{SV}$):

$$\Phi_{i,j}^{if} = (R_{i,j} + c \cdot (\Delta t_{rec,i} - \Delta t_{SV,j}) + \Delta_{i,j}^{tr}) + \delta_{i,j}^{if},$$

$$\text{где } \gamma = \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2} = \frac{\lambda_{L1}^2}{\lambda_{L2}^2};$$

$$\delta_{i,j}^{if} = \frac{\delta_{L1,i,j}^{mp} + \varepsilon_{L1,i,j} - \gamma \cdot (\delta_{L2,i,j}^{mp} + \varepsilon_{L2,i,j})}{1 - \gamma}.$$

Формирование при сетевой обработке информации первых разностей IF-комбинаций (разность IF-комбинаций измерений двух станций при фиксированном спутнике: $\Delta \Phi_{1,i,j}^{if} = \Phi_{1,i,j}^{if} - \Phi_{i,j}^{if}$, 1 – идентификатор опорной станции) позволяет исключить расхождение шкалы времени спутника и единой системной шкалы времени ($\Delta t_{SV,j}$). При этом расхождения шкал времени различных станций относительно системной шкалы трансформируются в расхождение шкал времени между станциями. Соответствующее выражение имеет вид:

$$\Delta \Phi_{1,i,j}^{if} = R_{1,j} - R_{i,j} + c \cdot \Delta t_{rec,1,i} + \Delta_{1,j}^{tr} - \Delta_{i,j}^{tr} + \delta_{1i,j}^{if},$$

где $\Delta t_{rec,1,i} = \Delta t_{rec,1} - \Delta t_{rec,i}$ – расхождение шкал времени приемников базовых станций;

$$\delta_{1i,j}^{if} = \frac{\delta_{L1,1,i}^{mp} + \varepsilon_{L1,1,i} - \gamma \cdot (\delta_{L2,1,i}^{mp} + \varepsilon_{L2,1,i})}{1 - \gamma} - \frac{\delta_{L1,i,j}^{mp} + \varepsilon_{L1,i,j} - \gamma \cdot (\delta_{L2,i,j}^{mp} + \varepsilon_{L2,i,j})}{1 - \gamma}.$$

Таким образом, сформированная комбинация содержит неизвестные величины $c \cdot \Delta t_{rec,1,i}$, $\Delta_{1,j}^{tr}$, $\Delta_{i,j}^{tr}$, а также разность геометрических расстояний между базовыми станциями и спутником ($R_{1,j} - R_{i,j}$), оцениваемую на основании координат станций и эфемерид спутника, и комбинацию в общем случае неконтролируемых медленноменяющихся и шумовых погрешностей измерений ($\delta_{1i,j}^{if}$).

Величина тропосферной задержки сигнала зависит от угла возвышения спутника над горизонтом и в первом приближении (т.е. без учёта выделения гидростатической и влажной составляющих задержки) определяется выражением:

$$\Delta_{i,j}^{tr} = \Delta_{i,j}^{tr,z} \cdot m(\beta_{i,j}),$$

где $m(\beta_{i,j})$ – функция, устанавливающая соответствие между тропосферной задержкой сигнала от спутника, расположенного в зените, и задержкой сигнала от спутника, имеющего угол возвышения

$$\beta_{(i),j}. \text{ В первом приближении } m(\beta_{i,j}) = \frac{1}{\sin(\beta_{(i),j})};$$

$\Delta_{i,j}^{tr,z}$ – зенитная тропосферная задержка в точке размещения антенны приёмника.

Таким образом, при оценивании тропосферных задержек по информации группы базовых ГНСС-станций отыскиваемыми параметрами являются непосредственно зенитные тропосферные задержки в местах расположения приёмников и расхождения шкал времени этих приёмников относительно шкалы времени приёмника опорной станции.

2. ОЦЕНИВАНИЕ ТРОПОСФЕРНЫХ ЗАДЕРЖЕК ПО СИГНАЛАМ ГНСС

Оценки тропосферных задержек формируются как результат решения следующей системы уравнений, включающей измерения всех наблюдаемых станциями 1 и i навигационных спутников.

$$\begin{pmatrix} \vdots \\ \Delta\tilde{\Phi}_{1,i,j}^{if}(t_n) \\ \vdots \\ \delta\Delta^{tr,z} \end{pmatrix} = H_{1i} \cdot \begin{pmatrix} c \cdot \Delta t_{rec,1,i} \\ \Delta_1^{tr,z} \\ \delta_{1i}^{tr,z} \end{pmatrix},$$

где $\delta\Delta_{1i}^{tr,z} = \Delta_i^{tr,z} - \Delta_1^{tr,z}$ – разница зенитных тропосферных задержек сигналов в точках расположения приёмников 1 и i ;

$$\Delta\tilde{\Phi}_{1,i,j}^{if}(t_n) = \Delta\Phi_{1,i,j}^{if}(t_n) - (R_{1,j}(t_n) - R_{i,j}(t_n));$$

$$H_{1i} = \left\| \begin{array}{c|c} Q_{1i}(t_n) & M_{1i}(t_n) \\ \hline 0 & 0 \ 1 \end{array} \right\|;$$

$$Q_{1i}(t_n) = \left\| \begin{array}{c} J \\ 1 \ \dots \ 1 \end{array} \right\|^T;$$

J – количество навигационных спутников в эпоху t_n ;

$$M_{1i}(t_n) = \left\| \begin{array}{c} \vdots \\ m(\beta_{1,j}) - m(\beta_{i,j}) \quad -m(\beta_{i,j}) \\ \vdots \\ \vdots \end{array} \right\|;$$

$\delta\Delta_{1i}^{tr,z}$ – априорное значение разницы зенитных тропосферных задержек $\delta\Delta_{1i}^{tr,z}$.

Учитывая то, что зенитная тропосферная задержка $\Delta_i^{tr,z}$ – медленноменяющаяся функция, можно её представить в виде:

$$\Delta_i^{tr,z} = \Delta_1^{tr,z} + \delta_{1i}^{tr,z},$$

где $\delta\Delta_{1i}^{tr,z} = \Delta_i^{tr,z} - \Delta_1^{tr,z}$ – разность между зенитными тропосферными задержками сигналов в точках расположения приемников 1 и i . При этом $|\delta\Delta_{1i}^{tr,z}| \ll \Delta_1^{tr,z}$.

Последнее условие дает возможность дополнить систему уравнений, которая будет использоваться для определения зенитных тропосферных задержек, дополнительным уравнением:

$$\delta\Delta_{1i}^{tr,z} = \delta\Delta^{tr,z},$$

где $\delta\Delta^{tr,z} = 0$. Причем, дисперсия априорного значения $\delta\Delta^{tr,z}$ задаётся в виде $\sigma_{\delta\Delta^{tr,z}}^2 = (10^{-6} \cdot B_{1,i})^2$,

где $B_{1,i}$ – расстояние между станциями 1 и i (в метрах).

Решение данной системы уравнений отыскивается по методу наименьших квадратов (МНК):

$$\Delta_{1,i}^{tr} = \left(H_{1,i}^T \cdot (K_{1,i}^{if-I})^{-1} \cdot H_{1,i} \right)^{-1} \cdot H_{1,i}^T \cdot (K_{1,i}^{if-I})^{-1} \cdot \Delta\tilde{\Phi}_{1,i}^{if},$$

$$\text{где } K_{1,i}^{if-I} = \left\| \begin{array}{ccc|ccc} \cdot & & 0 & & 0 & \\ & (\sigma_{1,i,j}^{if-I})^2 & & & \vdots & \\ 0 & & \ddots & & 0 & \\ \hline 0 & \dots & 0 & & \sigma_{\delta\Delta^{tr,z}}^2 & \end{array} \right\|$$

– ковариационная матрица погрешностей $\Delta\tilde{\Phi}_{1,i}^{if}$;

$\sigma_{1,i,j}^{if-I}$ – оценка средней квадратичной ошибки (СКО) комбинации $\Delta\tilde{\Phi}_{1,i}^{if}$, содержащей погрешности фазовых измерений ($\Phi_{L1(L2),i,j}$) и погрешности координат базовых станций и навигационных спутников,

$$\Delta_{1,i}^{tr} = \left\| \begin{array}{c} c \cdot \Delta t_{rec,1,i} \\ \Delta_1^{tr,z} \\ \delta_{1i}^{tr,z} \end{array} \right\|.$$

Соответственно, ковариационная матрица погрешностей оценок составляющих вектора $\Delta_{1,i}^{tr}$ имеет вид:

$$K_{\Delta_{1,i}^{tr}} = \left(H_{1,i}^T \cdot (K_{1,i}^{if-I})^{-1} \cdot H_{1,i} \right)^{-1}.$$

Оценка вектора $\Delta_{1,i}^{tr}$ получена по измерениям одной эпохи. Учитывая то, что параметры тропосферы на протяжении некоторого интервала времени остаются практически неизменными, можно использовать все измерения на данном интервале и, тем самым, существенно повысить точность решения.

В данном случае количество неизвестных равняется $N + 2$ (N – количество эпох). При этом неизвестными являются $\{c \cdot \Delta t_{rec,1,i}(t_n)\}_{n=1..N}$, $\Delta_1^{tr,z}$ и $\delta_{1i}^{tr,z}$.

Таким образом, оценки тропосферных задержек $\vec{D}_{1,i} = \left\| \Delta_1^{tr,z} \quad \delta_{1i}^{tr,z} \right\|^T$ могут быть получены в виде:

$$\vec{D}_{1,i} = \left(\sum_n M_{1,i}^T(t_n) \cdot P_{1,i}(t_n) \cdot M_{1,i}(t_n) + \left\| \begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\delta\Delta^{tr,z}}^{-2} \end{array} \right\| \right)^{-1} \times \left(\sum_n M_{1,i}^T(t_n) \cdot P_{1,i}(t_n) \cdot \Delta\tilde{\Phi}_{1,i}^{if}(t_n) + \delta\Delta^{tr,z} \cdot \left\| \begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\delta\Delta^{tr,z}}^{-2} \end{array} \right\| \right),$$

где

$$P_{1,i}(t_n) = (K_{1,i}^{if-I}(t_n))^{-1} - \frac{1}{tr((K_{1,i}^{if-I}(t_n))^{-1})} \times (K_{1,i}^{if-I}(t_n))^{-1} \cdot Q_{1,i}(t_n) \cdot Q_{1,i}^T(t_n) \cdot (K_{1,i}^{if-I}(t_n))^{-1}.$$

Соответственно, ковариационная матрица погрешностей оценок вектора $\vec{D}_{1,i}$ имеет вид:

$$K_{\vec{D}_{1,i}} = \left(\sum_n M_{1,i}^T(t_n) \cdot P_{1,i}(t_n) \cdot M_{1,i}(t_n) + \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\delta\Delta^{tr,z}}^{-2} \end{vmatrix} \right)^{-1}.$$

3. МЕТОДИКА ВЕРИФИКАЦИИ АЛГОРИТМА

Для верификации алгоритма была использована информация базовых ГНСС-станций GLSV (Киев, Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины – ГАО НАНУ), CNIV (Чернигов), PRYL (Прилуки) и SMLA (Смела), зарегистрированная в сеансе измерений 10 декабря 2008 г.

Оценивание зенитных тропосферных задержек происходило на интервалах длительностью 30 и 60 мин.

Определение зенитных тропосферных задержек проводилось для отдельных пар станций (GLSV и CNIV, GLSV и PRYL, GLSV и SMLA). Станция GLSV выбрана в качестве основной для проведения анализа исходя из своего центрального географического расположения по отношению к другим станциям и наличия на её территории метеостанции.

В качестве основных критериев эффективности предложенного алгоритма выбраны:

- близость оценок зенитных тропосферных задержек для станции GLSV, полученных в результате поочередной совместной обработки информации данной станции с информацией других станций;

- соответствие оценок зенитных тропосферных задержек, полученных для станции GLSV, с оценками задержек, вычисленными по модели Hopfield [2], как одним из наиболее точных альтернативных методов их оценивания. Параметры тропосферы (температура, давление и влажность) для станции GLSV, использованные для вычислений по модели Hopfield, взяты с сайта метеостанции, расположенной на территории ГАО НАНУ [8];

- соответствие отклонений зенитных тропосферных задержек на периферийных станциях (CNIV, PRYL, SMLA) от зенитных тропосферных задержек на станции GLSV модели их пространственного изменения, обусловленной отличиями параметров тропосферы в местах их расположения.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ РАБОТЫ АЛГОРИТМА

На рис. 1 и 2 приведены разности оценок тропосферных задержек, полученных для станции GLSV по предложенному в данной статье алгоритму (интервал оценивания выбирался равным 30 и 60 минутам), и оценок, вычисленных по модели Hopfield с использованием данных метеостанции ГАО НАНУ.

Как видно на рис. 1 и 2, результаты оценивания тропосферных задержек для станции GLSV, сформированные с использованием информации каждой из пар задействованных станций, в целом соответствуют друг другу, что свидетельствует об устойчивости полученного решения. Причем оценки, полученные на интервале 60 мин., отличаются меньшим разбросом значений, чем оценки, полученные на интервале 30 мин.

Кроме того, следует отметить, что полученные оценки зенитных тропосферных задержек близки к значениям, полученным по модели Hopfield – в основном отклонения не превышают 10 см. Отклонения носят не регулярный характер, что свидетельствует о достоверности полученных оценок и возможности повышения качества решения за счёт применения фильтрации данных.

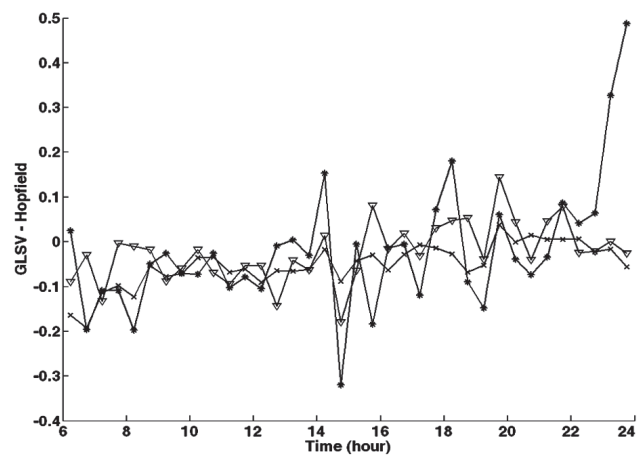


Рис. 1. Отклонения зенитных тропосферных задержек для станции GLSV относительно их модельных значений, определенных по модели Hopfield. Интервал оценивания – 30 минут (—*— GLSV и CNIV, —x— GLSV и PRYL, —▽— GLSV и SMLA)

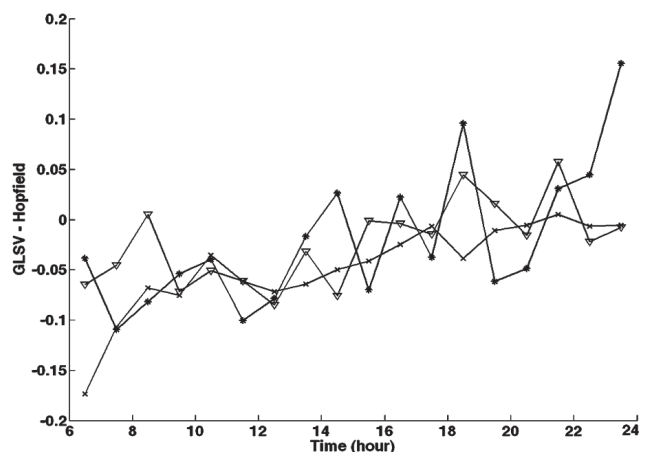


Рис. 2. Отклонения зенитных тропосферных задержек для станции GLSV относительно их модельных значений, определенных по модели Hopfield. Интервал оценивания – 60 минут.

Оценки отклонений зенитных тропосферных задержек для периферийных станций относительно станции GLSV приведены на рис. 3 и 4.

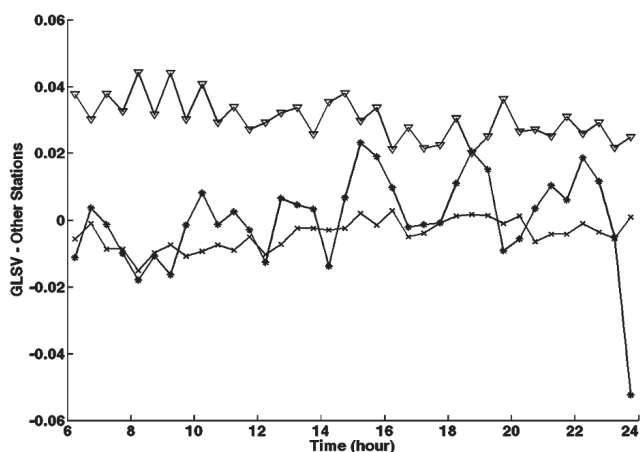


Рис. 3. Отклонения зенитных тропосферных задержек для периферийных станций относительно станции GLSV. Интервал оценивания – 30 минут (—*— — GLSV и CNIV, —x— — GLSV и PRYL, —▽— — GLSV и SMLA)

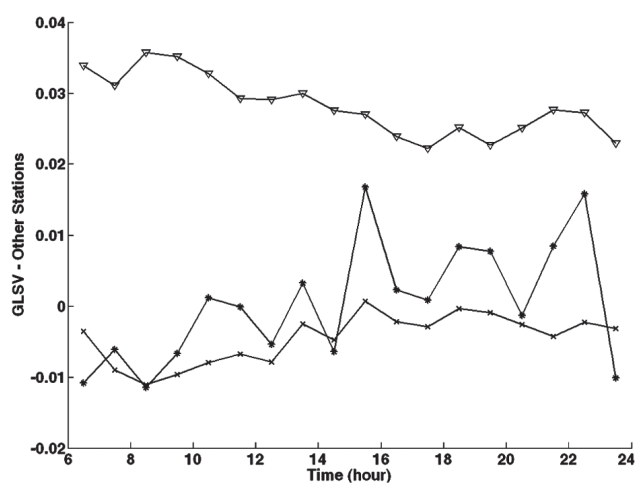


Рис. 4. Отклонение зенитных тропосферных задержек для периферийных станций относительно станции GLSV. Интервал оценивания – 60 минут (—*— — GLSV и CNIV, —x— — GLSV и PRYL, —▽— — GLSV и SMLA)

Как видно из рисунков, различие в величинах тропосферных задержек не превосходит нескольких сантиметров, что соответствует их ожидаемым в условиях явного отсутствия атмосферных фронтов значениям.

Оценки отклонений зенитных тропосферных задержек для периферийных станций относительно станции GLSV также имеют более стабильный характер при обработке на интервале 60 мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из результатов экспериментальной проверки алгоритма, оценки зенитных тропосферных задержек, полученные по различным наборам данных, хорошо согласуются друг с другом и не противоречат оценкам, полученным по широко применяемой в настоящее время модели Hopfield.

Кроме того, учитывая медленное изменение параметров тропосферы по времени, рекоменду-

ется оценивание тропосферных задержек по сигналам ГНСС проводить на интервалах продолжительностью не меньше одного часа.

Приведенный алгоритм позволяет оценивать зенитные тропосферные задержки в местах расположения базовых ГНСС-станций только по результатам их измерений. Его использование в сетях базовых станций даёт возможность оценивать тропосферные задержки в узлах сети и, в последующем, интерполировать на место расположения мобильного приёмника навигационных сигналов, выполняющего наблюдения в пределах этой сети.

Литература:

- [1] *Saastamoinen I. I.* Contribution to the theory of atmospheric refraction. Bulletin Geodesique, Vol. 105, No. 1 (1973), p. 13-34
- [2] *Seeber G.* Satellite geodesy: foundations, methods and applications. Walter de Gruyter, 1993
- [3] Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/ Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, RTCA/DO-229C, November 28, 2001.
- [4] *Rizos C.* Principles and practice of GPS surveying. Kensington, N.S.W.: School of Geomatic Engineering, University of New South Wales, 1997. vi, 555 p.
- [5] *Schueler, T., G.W. Hein, and B. Eissfeller.* A New Tropospheric Correction Model for GNSS Navigation Proceedings of GNSS 2001, V GNSS International Symposium, Spanish Institute of Navigation, Seville, Spain, May 8-11, 2001
- [6] *Penna, N., A. Dodson, & W. Chen.* Assessment of EGNOS tropospheric correction model, Journal of Navigation., 54(1), (2001). 37-55.
- [7] *S. Storm van Leeuwen, H. van der Marel, M. Tossaint, A. Martelluci.* Validation of SBAS MOPS Troposphere Model over the EGNOS Service Area. European Navigation Conference GNSS-2004, Rotterdam (the Netherlands), 17-19 May 2004.
- [8] Kyiv, Ukraine Weather <http://www.mao.kiev.ua/meteo/>.

Поступила в редколлегию 14.09.2011



Лукьянов Александр Михайлович, заведующий ПНИЛ Спутниковой навигации и инфокоммуникации НИЦ ИИРЭСТ, ХНУРЭ. Область научных интересов: навигация с использованием сигналов ГНСС.



Гринченко Елена Владимировна, научный сотрудник ПНИЛ Спутниковой навигации и инфокоммуникации НИЦ ИИРЭСТ, ХНУРЭ. Область научных интересов: навигация с использованием сигналов ГНСС.



Лукьянова Ольга Алексеевна, ведущий инженер НИЦ ИИРЭСТ, ХНУРЭ. Область научных интересов: навигация с использованием сигналов ГНСС, безопасность дорожного движения.



Галевич Максим Николаевич, ведущий инженер НИЦ ИИРЭСТ, ХНУРЭ. Область научных интересов: навигация с использованием сигналов ГНСС, безопасность дорожного движения.

УДК 629.783.527

Оцінювання величин зенітних тропосферних затримок по інформації базових ГНСС-станцій / О.М. Лук'янов, О.В. Грінченко, О.О. Лук'янова, М.М. Галевич // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2011. Том 10. № 3. — С. 307-312.

Розглядаються алгоритми визначення величин зенітних тропосферних затримок по інформації мережі ГНСС-станцій, проводиться їх обґрунтування. Приведені результати експериментальної перевірки ефективності запропонованих алгоритмів.

Ключові слова: тропосферна затримка, ГНСС, базова станція, псевдодальність.

Лл. 04. Бібліогр: 08 найм.

UDC 629.783.527

Estimating values of zenithal tropospheric delays by information of base GNSS-stations / A.M. Luk'yanov, E.V. Grinchenko, O.A. Luk'yanova, M.N. Galevich // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2011. Vol. 10. № 3. — P. 307-312.

Algorithms of determining values of zenithal tropospheric delays by information of a network of base GNSS-stations are considered and grounded. Results of the experimental efficiency checking of the offered algorithms are presented.

Keywords: tropospheric delay, GNSS, base station, phase pseudorange.

Fig. 04. Ref.: 08 items.