

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗЕНИТНЫХ ТРОПОСФЕРНЫХ ЗАДЕРЖЕК В ГНСС-СЕТИ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ

Лукьянов А.М., Гринченко Е.В., Галевич М.Н., Лукьянова О.А.  
Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
61166, Харьков, пр. Ленина, 14, НИЦ ИИРЭСТ, тел. (057) 70-21-532,  
E-mail: [lukyanov@kture.kharkov.ua](mailto:lukyanov@kture.kharkov.ua); факс (057) 70-21-472

Algorithm determination of the zenithal troposphere delays value on information of network of the base GNSS-stations is examined. Results of the experimental verification efficiency of the offered algorithms are presented.

**Введение.** Влияние тропосферы на распространение радиосигналов проявляется в их задержке. Величина задержки зависит от коэффициента рефракции ( $n$ ) и определяется интегралом вдоль пути распространения сигнала ( $s$ ):

$$\delta^{trop} = \int (n - 1) \times ds . \quad (1)$$

За последние десятилетия предложено большое количество методик, которые позволяют оценить значение тропосферных задержек сигналов. К ним относятся модели Saastamoinen (1972), Hopfield (1969), Lanyi (1984), Chao (1972), Marini i Murray (1973), Elgered (1985), Davis (1985), Rahnemoon (1988), Ifadis (1986), Black (1978), Yionoulis (1970), Davis, Bauersima (1983), Mendes (1998), Herring (1992), Niell (1996, 2000), модель, рекомендованная MOPS (2001) и другие. Такое большое количество моделей является следствием сложности решения задачи моделирования пространственного распределения параметров тропосферы (температуры, давления и влажности).

Основным недостатком этих моделей является то, что они не учитывают реальное пространственное распределение параметров тропосферы. Существующие модели в большинстве базируются на использовании приземных данных о параметрах реальной тропосферы в месте дислокации приемника навигационных сигналов. А некоторые из них, например, модель MOPS, используют прогнозируемые значения температуры, давления и влажности на основе сезонных трендов их поведения.

Компенсация тропосферных задержек при обработке навигационных сигналов на основе только приземных, реальных или прогнозируемых, значений параметров тропосферы позволяет определять зенитные тропосферные задержки сигналов с точностью 5–10 см (95%).

В высокоточных приложениях – спутниковой геодезии и т.п., для повышения точности компенсации тропосферных задержек целесообразно использовать технологии, которые позволяют учесть реальное состояние тропосферы.

**Алгоритм определения зенитных тропосферных задержек в местах дислокации базовых станций ГНСС-сети.** Предложенный алгоритм определения зенитных тропосферных задержек является усовершенствованием алгоритмов, разработанных в рамках научно-технических проектов по созданию информационно-вычислительной ГНСС-системы и сетевой VRS-технологии обеспечения геодезических и кадастровых съемок [1, 2].

Предложенный алгоритм определения зенитных тропосферных задержек основан на использовании первых разностей свободных от влияния ионосферы комбинаций измерений двухчастотных приемников навигационных сигналов, расположенных на базовых станциях сети. Рассмотрим его детальнее.

В рамках предложенного алгоритма в сети, состоящей из трех, или больше станций, предполагается двухэтапная обработка информации. На первом этапе определяются тропосферная задержка на центральной (первой) станции и отклонения задержек на периферийных станциях от центральной. На втором этапе – последующая общая обработка оценок тропосферных задержек, полученных по информации каждой пары на первом этапе. Данный, двухэтапный подход позволяет избежать большой размерности решаемой системы уравнений. Но на втором этапе требует корректного учёта корреляционных связей результатов обработки первого этапа. В целом, это позволяет не усложнять обработку ин-

формации одновременной работой с большими файлами измерительной информации всех станций сети, что достаточно удобно.

По измерительной информации центральной и каждой из периферийных станций определяются векторы  $\vec{D}_{1,i} = \begin{pmatrix} \Delta_1^{tr,z} \\ \delta_{li}^{tr,z} \end{pmatrix}$  (где  $i=2..V$ ,  $V$  – количество станций в сети). Соответствующая система уравнений, предназначенная для совместного оценивания зенитных тропосферных задержек для каждой из станций сети, имеет вид:

$$\begin{pmatrix} \vec{D}_{1,2} \\ \vdots \\ \vec{D}_{1,i} \\ \vdots \\ \vec{D}_{1,V} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_2 \\ \vdots \\ g_i \\ \vdots \\ g_V \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta_1^{tr,z} \\ \delta_{12}^{tr,z} \\ \vdots \\ \delta_{li}^{tr,z} \\ \vdots \\ \delta_{1V}^{tr,z} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $g_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}$  – матрица размерностью  $2 \times V$ .

Решение данной системы отыскивается по методу наименьших квадратов:

$$\begin{pmatrix} \Delta_1^{tr,z} \\ \delta_{12}^{tr,z} \\ \vdots \\ \delta_{li}^{tr,z} \\ \vdots \\ \delta_{1V}^{tr,z} \end{pmatrix} = \left( \begin{pmatrix} g_2 \\ \vdots \\ g_i \\ \vdots \\ g_V \end{pmatrix}^T \cdot K_D^{-1} \cdot \begin{pmatrix} g_2 \\ \vdots \\ g_i \\ \vdots \\ g_V \end{pmatrix} \right)^{-1} \cdot \begin{pmatrix} g_2 \\ \vdots \\ g_i \\ \vdots \\ g_V \end{pmatrix}^T \cdot K_D^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \vec{D}_{1,2} \\ \vdots \\ \vec{D}_{1,i} \\ \vdots \\ \vec{D}_{1,V} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $K_D = \begin{pmatrix} K_{1,2}^{if-I} & K_{D_{1,2},D_{1,i}} & K_{D_{1,2},D_{1,V}} \\ & \ddots & \ddots \\ K_{D_{1,i},D_{1,2}} & K_{1,i}^{if-I} & K_{D_{1,i},D_{1,V}} \\ & \ddots & \ddots \\ K_{D_{1,V},D_{1,2}} & K_{D_{1,V},D_{1,i}} & K_{1,V}^{if-I} \end{pmatrix}$ ;  $K_{D_{1,i},D_{1,j}}$  – матрица оценок ковариаций

векторов  $D_{1,i}$  и  $D_{1,j}$ .

Для моделирования алгоритма была использована информация станций GLSV (Киев), 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, как для отдельных пар станций (GLSV и CNIV, GLSV и PRYL, GLSV и SMLA), так и в сетевом режиме сразу для совокупности всех станций сети.

Сравнительный анализ решений для каждой из пар станций позволил проконтролировать качество решений – их взаимное соответствие. Оценки зенитных тропосферных задержек для станции GLSV, сформированные с использованием разных наборов данных, в целом отвечают друг другу. Причем, оценки, полученные на интервале 60 мин., отличаются меньшим разбросом значений чем оценки, полученные на интервале 30 мин. Аналогичный вывод можно сделать и по оценкам задержек для станции GLSV, полученным с одновременным использованием информации всех станций сети (рис. 1 и 2). Оценки от-

клонений зенитных тропосферных задержек для периферийных станций относительно станции GLSV также имеют более стабильный характер при обработке на интервале 60 мин. (рис. 3 и 4).

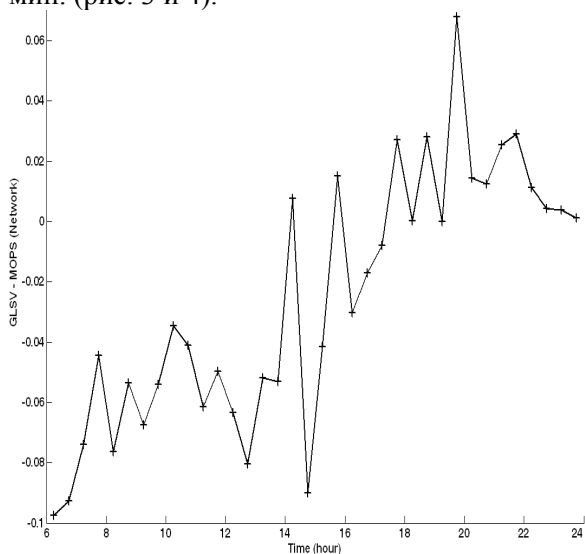


Рис. 1. Отклонение зенитных тропосферных задержек для станции GLSV относительно их модельных значений, определенных по методике MOPS. Интервал оценивания – 30 минут

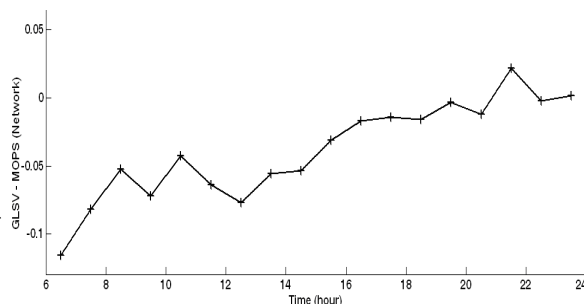


Рис. 2. Отклонение зенитных тропосферных задержек для станции GLSV относительно их модельных значений, определенных по методике MOPS. Интервал оценивания – 60 минут

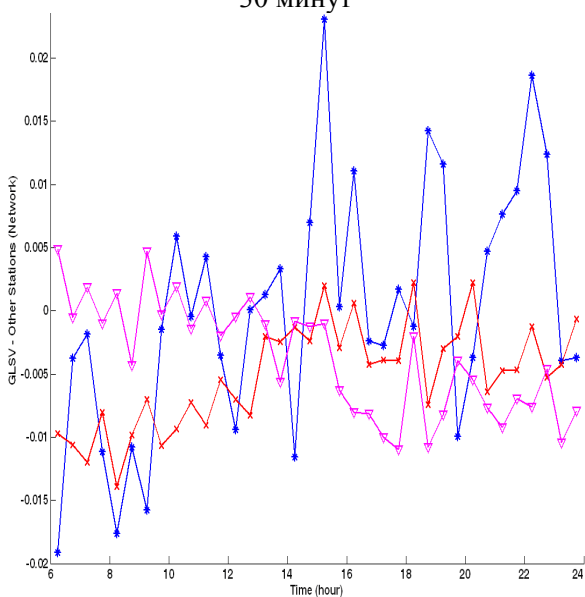


Рис.3. Отклонение зенитных тропосферных задержек для периферийных станций относительно станции GLSV. Сетевая оценка. Интервал оценивания – 30 минут. ( \* – GLSV и CNIV, × – GLSV и PRYL, ▽ – GLSV и SMLA)

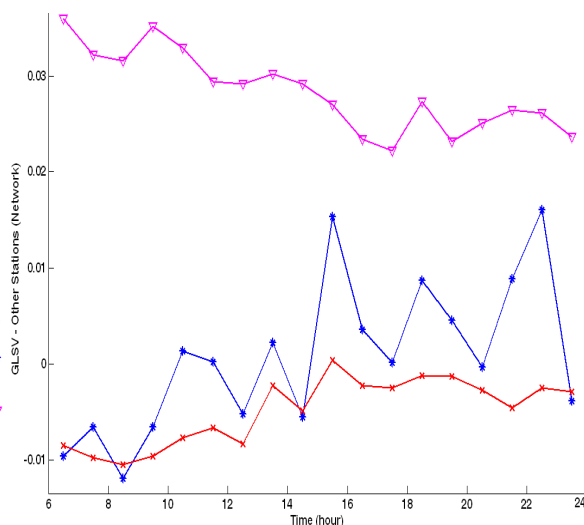


Рис. 4. Отклонение зенитных тропосферных задержек для периферийных станций относительно станции GLSV. Сетевая оценка.

Интервал оценивания – 60 минут.

( \* – GLSV и CNIV, × – GLSV и PRYL, ▽ – GLSV и SMLA)

Точность полученных оценок зенитных тропосферных задержек зависит от двух видов погрешностей – быстроменяющихся и медленноменяющихся погрешностей. Погрешности определения тропосферных задержек, обусловленные быстроменяющимися составляющими погрешностей измерений характеризуются среднеквадратическими отклонениями (СКО). СКО оценок зенитных тропосферных задержек для станции GLSV не

превышает 7 мм при оценивании на интервале 30 мин. и 3,5 мм при оценивании на интервале 60 мин. СКО оценок отклонений зенитных тропосферных задержек для периферийных станций относительно станции GLSV не превышает 0,8 мм при оценивании на интервале 30 мин. и 0,3 мм при оценивании на интервале 60 мин.

Полученные СКО оценок не являются доминирующими в погрешностях определения тропосферных задержек. Намного больший вклад вносят медленноменяющиеся составляющие погрешностей, например, погрешности, обусловленные многолучевым распространением сигналов. Соответствующие смещения в оценках зенитных тропосферных задержек для станции GLSV могут достигать 10 см при оценивании на интервале 30 мин. и 4,5 см при оценивании на интервале 60 мин. Смещения в оценках зенитных тропосферных задержек для периферийных станций относительно станции GLSV могут достигать 1,2 см при оценивании на интервале 30 мин. и 4,5 мм при оценивании на интервале 60 мин.

Таким образом, на точность построения региональной модели тропосферы в наибольшей мере влияют погрешности, обусловленные многолучевым распространением сигналов. Соответственно, можно рекомендовать оценивание тропосферных задержек по сигналам ГНСС проводить на интервалах продолжительностью не меньше одного часа.

**Выводы.** Относительно полученных результатов обработки можно заметить следующее.

Рис. 1 и 2 отображают отклонения вычисленных оценок зенитных тропосферных задержек для станции GLSV от оценок, полученных с использованием методики MOPS [3]. Как видно из этих рисунков, оценка задержки, полученная по разработанным алгоритмам, достаточно близкая к оценке по методике MOPS. Учитывая, что по результатам исследований [4, 5, 6] методике MOPS присущий значения RMS (Root Mean Squared) от 3,9 до 5,1 см, можно утверждать о достоверности вычисленных оценок.

Еще одним подтверждением качества полученного результата являются значения оценок отклонений зенитных тропосферных задержек для периферийных станций относительно станции GLSV (рис. 3 и 4). Эти оценки соответствуют ожидаемым значениям для базовых станций сети в условиях явного отсутствия атмосферных фронтов.

### Литература.

1. Науково-технічний звіт про виконання НДР «Розробка та дослідження підсистеми збору і автоматизованої післясеансної обробки GNSS спостережень споживачів з використанням зональних VRS- корекцій та підсистеми розповсюдження диференціальних DGPS/RTK корекцій в реальному часі з використанням технології NTRIP» (шифр «Мережа – ХНУРЕ/2007»), ХНУРЕ, номер держреєстрації 0107U008721, грудень 2007, 116 стор., додатки 1, 2, 3.

2. Науково-технічний звіт про виконання НДР «Удосконалення та дослідження апаратно-програмного комплексу збору і автоматизованої мережної обробки GNSS-спостережень» (шифр «Мережа – ХНУРЕ/2008»), ХНУРЕ, номер держреєстрації 0108U008263, грудень 2008, 83 стор., додаток 1.

3. Manual for the validation of GNSS in civil aviation. European Commission DG VII. 2000

4. 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

5. Penna, N., A. Dodson, 4.2 W. Chen. Assessment of EGNOS tropospheric correction model, Journal of Navigation., 54(1), (2001). 37-55.

6. 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.