

ОЦЕНКА И ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ЗЕНИТНЫХ ТРОПОСФЕРНЫХ ЗАДЕРЖЕК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГНСС-НАБЛЮДЕНИЙ СЕТИ РЕФЕРЕНЦНЫХ СТАНЦИЙ

Введение

В группу источников погрешностей, в наибольшей мере влияющих на результаты координатных ГНСС-определений, входят тропосферные задержки навигационных сигналов на трассах «спутники–приемники» [1, 2]. Для поиска возможностей уменьшения влияния рассматриваемого источника погрешностей на точность координатных определений, особенно при выполнении относительного традиционного и сетевого позиционирования на сантиметровом уровне точности, необходимо рассмотреть основные методы и особенности учета (или оценки) тропосферных задержек. В большинстве случаев при выполнении ГНСС-измерений практические трудности вызывает использование дополнительного оборудования для точной оценки метеопараметров (температуры, давления, влажности) вблизи приемников потребителей с целью более точного учета тропосферных задержек с использованием известных моделей [2 – 5]. При этом, как показывает практический опыт, даже наличие высокоточных измерений метеопараметров вблизи ГНСС-приемников не гарантирует эффективную компенсацию интегральных тропосферных задержек на трассах распространения сигналов ввиду неопределенности распределения влажностной составляющей показателя преломления по высоте [2, 3].

В практике точного ГНСС позиционирования используется, в основном, два подхода для компенсации тропосферной составляющей погрешности измерений:

- 1) расчет и компенсация тропосферных задержек по моделям, которые основаны на использовании среднесезонных значений метеопараметров для различных широт [2, 4, 5];
- 2) оценка текущих зенитных тропосферных задержек (ЗТЗ) сигналов ГНСС одновременно на нескольких перманентных референчных станциях сети, покрывающей определенную зону, с использованием высокоточных двухчастотных фазовых наблюдений.

На сегодняшний день одной из самых распространённых наилучших моделей, которые позволяют учесть задержку ГНСС сигналов в тропосфере, является модель MOPS (Minimum Operational Performance Standards for GPS) [2, 5]. Данная модель была разработана для использования в широкозонных системах дифференциальной навигации WAAS (США), EGNOS (ЕС) и др. Модель MOPS не использует наземных метеорологических данных (но и возможность их использования не исключает). Для расчета задержки используются наборы данных о средних значениях метеорологических параметров и скорости изменения температуры атмосферы для различных широтных поясов с шагом 15 градусов и порядкового дня в году. В результате анализа подобных баз данных вычисляются необходимые для расчета задержки параметры: давление, температура, вертикальный градиент плотности водяных паров.

Однако модель MOPS (которая является общепринятой в спутниковой навигации) позволяет довольно точно определить среднесуточное значение ЗТЗ, тем не менее не позволяет моделировать изменения ЗТЗ с достаточной точностью в нестандартных условиях (например, при наличии атмосферных фронтов, осадков и т.д.). Изменения ЗТЗ в таких условиях могут приводить к отклонениям ЗТЗ от модельных значений до 20 – 30 см (например, в летний период, когда тропосфера может быть сильно возмущена). При использовании дифференциального режима позиционирования остаточная тропосферная погрешность моделирования зависит от базового расстояния и растет с его увеличением. Помимо этого, погрешности вычислений поправок по модели MOPS, как показывает практика, заметно увеличиваются, если высоты «ровера» (движущегося приемника потребителя) и референчной станции (РС) значительно отличаются. Поэтому во многих случаях, когда требуется достижение

более высокой точности позиционирования, необходимо оценивать ЗТЗ по фазовым ГНСС-наблюдениям, особенно при относительных определениях на длинных базовых расстояниях (свыше 200 км). Мировая практика выработала для этих целей несколько различных подходов. Так, известен подход, когда выполняют оценку одновременно и влажностной и сухой компоненты ЗТЗ. Такой подход не всегда оправдан, особенно на базах ~200 – 500 км, когда эти компоненты сложно разделить из-за сильной корреляции [2]. Альтернативный подход заключается в оценке суммарной ЗТЗ (разностей ЗТЗ на станциях/приемниках), без разделения на сухую (гидростатическую) и влажностную компоненты (см., например, [6]).

Описанные известные подходы, предполагающие оценку ЗТЗ, применяют только для неподвижных (или медленно перемещающихся) двухчастотных приемников или стационарных неподвижных станций, так как оценка ЗТЗ совместно с информационными (координатно-временными) параметрами с необходимой точностью требует длительного накопления ГНСС наблюдений – от 30 мин до 2 ч. Уточнить параметры тропосферной задержки для движущихся одночастотных или двухчастотных приемников можно путем интерполяции оценок градиентов тропосферных задержек в сетях перманентных референчных станций [6, 7]. Но, например, в работе [6] для решения такой задачи сетевого относительного позиционирования, во-первых, используется упрощенная функция разностей тропосферных задержек (допускается методическая погрешность), а во-вторых, при интерполяции не учитываются возможные значительные перепады высот станций и приемников потребителей, что вызывает дополнительные погрешности координатных определений (вертикальных составляющих).

Таким образом, актуальна задача поиска более совершенных способов оценивания и интерполяции ЗТЗ. Целью данной статьи является описание результатов разработки, исследования и верификации новых алгоритмов оценивания и сетевой интерполяции ЗТЗ, сочетающих достоинства каждого из описанных подходов. Ниже описан смешанный подход, отличающийся тем, что в ходе обработки фазовых ГНСС-наблюдений совместно оцениваются информационные параметры и суммарные (сухая и влажностная составляющие) ЗТЗ на станциях сети (или базы). При этом используется корректное преобразование (упрощение) полной двухкомпонентной модели ЗТЗ с учетом функций отображения Niell [4] для сухой и влажностной составляющих, а также вспомогательных оценок по модели MOPS. Такие преобразования позволили минимизировать остаточную методическую погрешность представления модели ЗТЗ в упрощенном виде. Предложен и уточненный вариант сетевой интерполяции ЗТЗ, учитывающий перепад высот станций и «роверных» приемников.

Алгоритм оценки зенитных тропосферных задержек

Исходя из зарубежного опыта обработки ГНСС-наблюдений был предложен усовершенствованный сетевой алгоритм оценки зенитных тропосферных задержек. Алгоритм основывается на использовании фазовых наблюдений не менее трех референчных станций (РС), что обусловлено необходимостью дальнейшей интерполяции ЗТЗ с РС на местоположение «роверного» приемника внутри сети. Однако описанный ниже алгоритм можно применить и для оценивания ЗТЗ на станциях одной базы.

Задержка сигнала в тропосфере представляется в виде суммы гидростатической и влажностной составляющих [2 – 5]:

$$\Delta_{\text{трон}}(\beta) = \Delta_h^z \cdot m_h(\beta) + \Delta_w^z \cdot m_w(\beta), \quad (1)$$

где $\Delta_{\text{трон}}(\beta)$ – суммарная тропосферная задержка, как функция угла места β ; Δ_h^z – гидростатическая ("сухая") составляющая ЗТЗ; Δ_w^z – влажностная составляющая ЗТЗ; $m_h(\beta)$, $m_w(\beta)$ – известные функции отображения (mapping functions) для гидростатической и влажностной составляющих ЗТЗ соответственно [2, 4, 5].

Для перехода от полной двухкомпонентной модели ЗТЗ (1) к упрощенной модели, где будет оцениваться только один параметр – суммарная (сухая плюс влажностная составляющие) ЗТЗ, представим (1) в виде

$$\mathbf{Z}_{Tro}(t) = [\mathbf{Z}_h(t) + \mathbf{Z}_w(t)] \cdot \mathbf{m}_h(t) + \mathbf{Z}_w(t) \cdot \Delta \mathbf{m}_{hw}(t). \quad (2)$$

где $\Delta \mathbf{m}_{hw}$ – разность функций отображения.

«Влажностное» слагаемое в (2) можно достаточно точно компенсировать, используя расчетную величину, например, используя модель MOPS, а также используя тот факт, что функции отображения гидростатической и влажностной составляющих мало отличаются [2, 4]. Составляющую $[\mathbf{Z}_h(t) + \mathbf{Z}_w(t)]$ теперь можно представить как суммарную задержку $\mathbf{Z}_\Sigma(t)$, подлежащую оцениванию. В результате получим следующую модель тропосферной задержки:

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{Z}_\Sigma(t) \cdot \mathbf{m}_h(t) - \hat{\mathbf{Z}}_w(t) \cdot \Delta \mathbf{m}_{hw}(t). \quad (3)$$

Здесь $\hat{\mathbf{Z}}_w(t)$ – величина влажной тропосферной задержки, рассчитанная по модели MOPS. Несложный расчет показывает, что методическая погрешность коррекции величины $\hat{\mathbf{Z}}_w(t) \cdot \Delta \mathbf{m}_{hw}(t)$ в фазовых наблюдениях не превышает нескольких миллиметров даже при максимальных допустимых отклонениях оценки $\hat{\mathbf{Z}}_w(t)$ от истинных величин.

В качестве функций отображения в предложенной упрощенной модели (3) в дальнейшем использованы функции отображения Niell [4], как наиболее точные и получившие широкое распространение [2, 5].

Дальнейшее изложение будет вестись с учетом того, что в используемых фазовых ГНСС-наблюдениях устранены аномальные и фазовые скачки, а также выполнено разрешение фазовой неоднозначности. Погрешности, связанные с ионосферной задержкой сигналов, скомпенсированы путем использования двухчастотных ГНСС-наблюдений приемников.

Разработанный алгоритм предполагает совместную оценку ЗТЗ и расхождений шкал времени приемников станций при условии, что координаты пунктов известны с высокой точностью (оценка ЗТЗ выполняется для перманентных референциальных станций).

Исходная система уравнений для случая трех станций имеет вид (один из пунктов будет референциальным, условно присвоим ему индекс «r»):

$$\begin{cases} \Delta \hat{\mathbf{L}}_{21}^j(t) - \Delta \mathbf{R}_{21}^j(t) = \Delta \hat{\mathbf{L}}_{21}^j(t) = \Delta_{\Delta 21}(t) + \Delta \mathbf{T}_{21}^j(t) + \delta \Delta \mathbf{L}_{21}^j(t), \\ \Delta \hat{\mathbf{L}}_{31}^j(t) - \Delta \mathbf{R}_{31}^j(t) = \Delta \hat{\mathbf{L}}_{31}^j(t) = \Delta_{\Delta 31}(t) + \Delta \mathbf{T}_{31}^j(t) + \delta \Delta \mathbf{L}_{31}^j(t) \end{cases}, \quad (4)$$

где $\Delta \hat{\mathbf{L}}_{ir}^j(t)$ – одинарные разности фазовых наблюдений на частоте L1 GPS между i -й и референциальной r -й станцией для j -го спутника на момент времени t ;

$\Delta \mathbf{R}_{ir}^j(t)$ – рассчитанные с высокой точностью (используются точные координаты станций и точные эфемериды спутников) одинарные разности геометрических расстояний между i -й и r -й станцией для j -го спутника на момент времени t ;

$\Delta_{\Delta ir}(t)$ – расхождение шкал времени между i -й и r -й станцией на момент времени t (оцениваемый параметр);

$\Delta \mathbf{T}_{ir}^j(t)$ – одинарные разности тропосферной задержки между i -й и r -й станцией для j -го спутника на момент времени t (оцениваемый параметр);

$\delta \Delta \mathbf{L}_{ir}^j(t)$ – шумовая и многолучевая составляющие погрешностей одинарных разностей фазовых наблюдений для j -го спутника на момент времени t .

Используя введенную выше модель тропосферной задержки (3), представим компоненту $\Delta T_{ir}^j(t)$ таким образом:

$$\Delta T_{ir}^j(t) = \Delta Z_{ir}(t) \cdot mf_{Hi}^j(t) + Z_r(t) \cdot [mf_{Hi}^j(t) - mf_{Hr}^j(t)] - \hat{\Theta}_{ir}^j, \quad (5)$$

где $\Delta Z_{ir}(t)$ – разность ЗТЗ между i -й и r -й станциями, $\Delta Z_{ir}(t) = Z_i(t) - Z_r(t)$; $Z_r(t)$ – ЗТЗ референционной станции;

$mf_{Hr}^j(t)$ – функция отображения для гидростатической составляющей ЗТЗ для референционной РС;

$mf_{Hi}^j(t)$ – функция отображения для гидростатической составляющей ЗТЗ для i -й станции;

$\hat{\Theta}_{ir}^j = \hat{Z}_{wi}(t) \cdot [mf_{Hi}^j(t) - mf_{wi}^j(t)] - \hat{Z}_{wr}(t) \cdot [mf_{Hr}^j(t) - mf_{wr}^j(t)]$ – остаточная погрешность, максимальная величина которой при минимальных углах места не превышает 4 мм,

$$\hat{\Theta}_{ir}^j \ll \Delta Z_{ir}(t) \cdot mf_{Hi}^j(t) + Z_r(t) \cdot [mf_{Hi}^j(t) - mf_{Hr}^j(t)],$$

$\hat{Z}_{wi,r}(t)$ – оценка влажностной составляющей ЗТЗ для $i(r)$ -й станции;

$mf_{wi,r}^j(t)$ – функция отображения для влажностной составляющей ЗТЗ для $i(r)$ -й станции.

Подставив в уравнения (4) сформированную модель тропосферной задержки (5), получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \Delta \hat{L}_{21}^j(t) + \hat{\Theta}_{21}^j = \Delta \tilde{L}_{21}^j(t) = \Delta_{\Delta 21}(t) + \Delta Z_{21}(t) \cdot mf_{H2}^j(t) + \\ + Z_1(t) \cdot [mf_{H2}^j(t) - mf_{H1}^j(t)] + \delta \Delta L_{21}^j(t) \\ \Delta \hat{L}_{31}^j(t) + \hat{\Theta}_{31}^j = \Delta \tilde{L}_{31}^j(t) = \Delta_{\Delta 31}(t) + \Delta Z_{31}(t) \cdot mf_{H3}^j(t) + \\ + Z_1(t) \cdot [mf_{H3}^j(t) - mf_{H1}^j(t)] + \delta \Delta L_{31}^j(t) \end{cases}, \quad (6)$$

В системе уравнений (6) оцениваемыми параметрами являются: $\Delta_{\Delta 21}(t)$, $\Delta_{\Delta 31}(t)$, $\Delta Z_{21}(t)$, $\Delta Z_{31}(t)$, $Z_1(t)$. Из них $\Delta_{\Delta 21}(t)$, $\Delta_{\Delta 31}(t)$ в данной постановке задачи являются неинформационными параметрами. Искомые неизвестные параметры определяются с использованием обобщенного метода наименьших квадратов. При оценке параметров ЗТЗ ($\Delta Z_{21}(t)$, $\Delta Z_{31}(t)$, $Z_1(t)$) полагаем, что эти параметры на заданном интервале (от 30 мин до 2 ч) являются постоянными в соответствии с рекомендациями [2, 4] и многих других источников. Было экспериментально установлено, что рекомендуемый интервал накопления данных для достаточно точной оценки ЗТЗ при базовых расстояниях $\sim 150 - 200$ км составляет один-два часа.

После оценки разности $\Delta Z_{ir}(t)$ можно определить значения ЗТЗ на всех станциях:

$$Z_i(t) = \Delta Z_{ir}(t) + Z_r(t), \quad (7)$$

Чтобы получить коррекции ЗТЗ на каждую эпоху наблюдений необходимо интерполировать полученные оценки ЗТЗ по времени. Для такой интерполяции оценок ЗТЗ использована аппроксимация кубическими сплайнами. При этом реализован усовершенствованный алгоритм интерполяции, который позволил устранить краевые эффекты. Пример сглаженной оценки ЗТЗ показан на рис. 1.

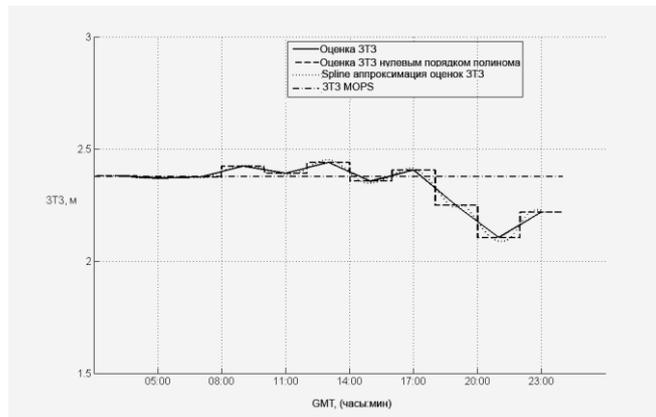


Рис. 1

Для исследования возможности повышения точности координатных определений с использованием метода оценивания ЗТЗ были использованы реальные GPS наблюдения (105-е, 208-е, 295-е GPS-сутки 2011 г. и 12-е GPS-сутки 2012 г.) сети станций NGCNET [http://www.ngcnet.com.ua/] НПП «Навигационно-геодезический центр» и станций IGS/EPN в Харьковской обл. Чтобы сравнить точность тропосферной коррекции по модели и с использованием оценок ЗТЗ, были выполнены соответствующие координатные определения по фазовым наблюдениям для обоих вариантов. Оценки координат станций для обоих вариантов сравнивались с эталонными значениями, полученными независимо с использованием апробированного программного обеспечения. На рис. 2, 3, в качестве примера приведены отклонения (в метрах) текущих оценок координат одной из станций сети NGCNET от эталонных значений – плановых координат (B, L) и высоты (H): а) при использовании модели MOPS, б) при использовании оценок ЗТЗ. Невязки, приведенные на рис. 2, получены для наблюдений, выполненных в летний период, а на рис. 3 – в зимний период.

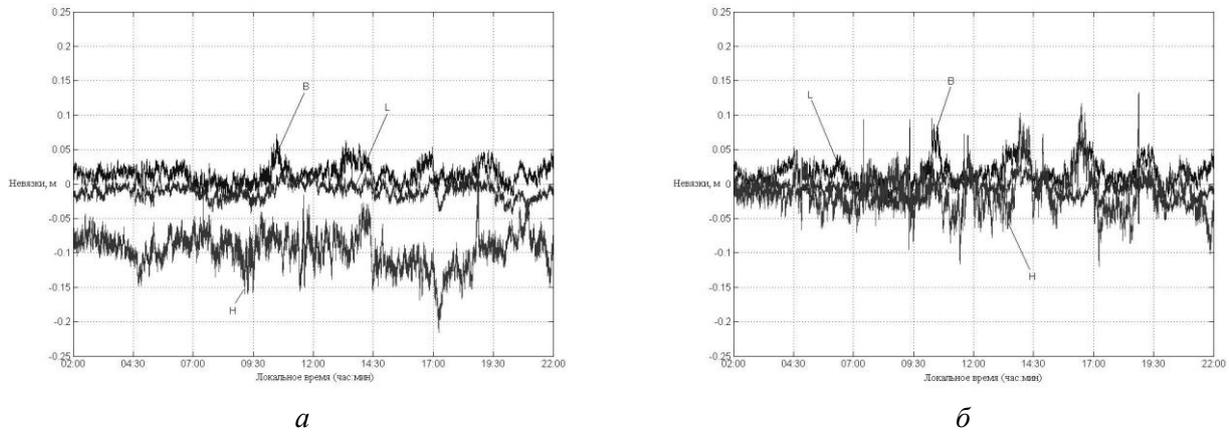


Рис. 2

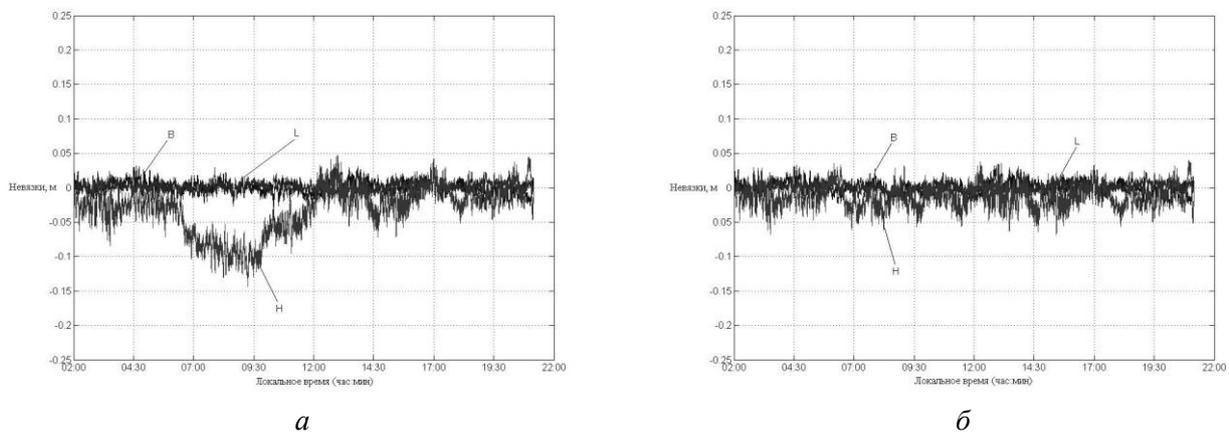


Рис. 3

Интерполяция оценок ЗТЗ базовых станций на местоположение «роверных» приемников потребителей

Напрямую использовать точные оценки зенитной тропосферной задержки, оцененные для референчных ГНСС-станций, для «роверных» приемников потребителей не позволяет фактор отличающихся высот приемников сигналов ГНСС. Поскольку оценка тропосферной задержки в значительной степени зависит от перепада высот ($\sim 0,3$ мм/м), игнорирование этого фактора может привести к значительным методическим погрешностям при расчете тропосферных коррекций для приемников потребителей. Поэтому первым важным этапом при интерполяции тропосферных коррекций является пересчет с использованием модели (например, модели MOPS) оценок ЗТЗ референчных станций на заданную одну и ту же высоту, например, на высоту референчной станции. Погрешность такого пересчета не превысит нескольких миллиметров на 100 м разности высот приемников. Затем выполняется линейная интерполяция приведенных к одной высоте оценок ЗТЗ станций на месторасположение «роверных» приемников. После этого, также с использованием модели, для каждого «роверного» приемника выполняется пересчет тропосферных коррекций на его текущую высоту.

Рассмотрим более детально выполнение линейной интерполяции оценок ЗТЗ референчных станций. Для простоты рассмотрим вначале плоский случай для двух референчных станций и роверного приемника (см. рис. 4). Изменение (разность) $\hat{\Phi}_{21}(\Delta\varphi_{21})$ зенитной тропосферной задержки между первой и второй станциями линейно зависит от угла $\Delta\varphi_{21}$:

$$\hat{\Phi}_{21}(\Delta\varphi_{21}) = a \cdot \Delta\varphi_{21}; \quad (8)$$

Оценив из (8) коэффициент a ($\Delta\varphi_{21}$ известен), и, зная угол $\Delta\varphi_{31}$ раскрыва между первой станцией и приемником потребителя, находим изменение ЗТЗ $\hat{\Phi}_{31}(\Delta\varphi_{31})$ для «роверного» приемника.

Для трехмерного случая:

$$\hat{\Phi}_{i1}(\Delta B_{i1}, \Delta L_{i1}) = a \cdot \Delta B_{i1} + b \cdot \Delta L_{i1}; \quad (9)$$

где $\Delta B_{i1}, \Delta L_{i1}$ – углы по широте и долготе i -й станции относительно референчной станции; a, b – градиенты.

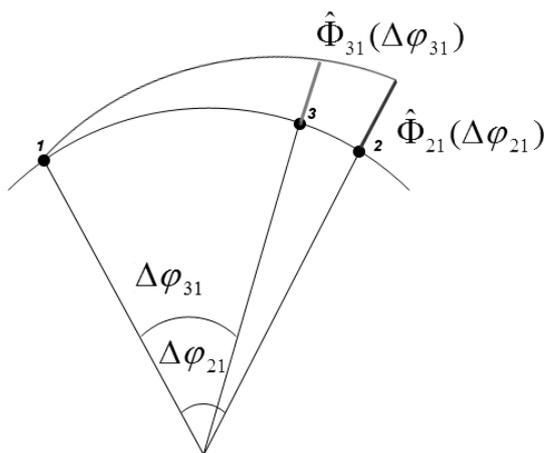


Рис. 4

Оценив параметры a , b по известным значениям $\hat{\Phi}_{i1}$, ΔB_{i1} , ΔL_{i1} ($i=2, 3$), находим изменение ЗТЗ для «роверного» приемника:

$$\hat{\Phi}_{rov1}(\Delta B_{rov1}, \Delta L_{rov1}) = \hat{a} \cdot \Delta B_{rov1} + \hat{b} \cdot \Delta L_{rov1} \quad (10)$$

Зная ЗТЗ на референционной станции и разность $\hat{\Phi}_{rov1}$, вычисляем ЗТЗ для «роверного» приемника. После этого выполняем пересчет ЗТЗ приемника потребителя на его текущую высоту с использованием модели, как это изложено выше.

Оценка точности алгоритма оценки и интерполяции ЗТЗ проводилась с использованием суточных наблюдений, полученных в различные периоды года (см. выше), для следующих станций из состава сети NGCNET: «IZUM» (г. Изюм), «KPSK» (г. Купянск), «PRVM» (г. Первомайск), «ZOCH» (г. Золочев). Кроме станций сети NGCNET в состав измерительной информации были включены наблюдения перманентной референционной IGS станции «KHAR» (Харьков), которая использовалась в качестве референционной.

В таблице приведены средние значения (в процентном выражении) повышения точности определения высот станций при использовании интерполированных оценок ЗТЗ по сравнению с расчетными оценками по модели MOPS.

Станция	GPS-сутки/год			
	105/2011	208/2011	295/2011	012/2012
	Повышение точности определения высот станций (H), %			
PRVM	39	31	30	36
IZUM	54	20	26	53
KPSK	52	93	26	50
ZOCH	92	85	56	46

Анализ результатов обработки сети референчных перманентных станций NGCNET по сезонам в целом показал, что использование оценок ЗТЗ и их интерполяции при координатных определениях позволяет повысить точность определения высотной составляющей от 20 до 90 % в зависимости от активности и сезонных изменений в тропосфере (дождь, снег, атмосферные фронты и т.д.). Выигрыш же в точности определения плановых координат практически незаметен, что подтверждает известные из мирового опыта теоретические и практические результаты. Сравнения оценок ЗТЗ с модельными значениями для осеннего и зимнего периодов показали, что их расхождения в среднем не превышают 5 – 10 см, а в весенний и летний периоды – 20 – 25 см, т.е. тропосфера наиболее изменчива в летний период и наименее – в зимний период, что также известно из многолетней практики ГНСС-определений.

Необходимо отметить, что успешная линейная интерполяция ЗТЗ референчных станций на территорию, окаймлённую этими станциями, возможна только в том случае, если известно, что внутри этой территории не было сильных дождей или снегопадов, отсутствовали перемещающиеся атмосферные фронты. В противном случае интерполяция ЗТЗ может привести к заметному ухудшению точности координатных определений, впрочем, как и использование тропосферных моделей.

Выводы

В ходе выполненных исследований предложена корректно модифицированная функциональная тропосферная модель в уравнениях ГНСС наблюдений. Разработаны алгоритмы оценивания и сетевой интерполяции зенитных тропосферных задержек, учитывающие перепады высот станций и «роверных» приемников потребителей.

Представлены результаты экспериментальной верификации разработанных алгоритмов с использованием реальных фазовых ГНСС наблюдений. Так, в режиме дифференциальных

координатных определений выигрыш в точности оценки высотной составляющей с использованием оцененных параметров тропосферы вместо модельных значений, составляет от 20 до 90 % в зависимости от активности и сезонных изменений в тропосфере (дождь, снег, атмосферные фронты и т.д.). При этом необходимый интервал накопления для точной оценки зенитных тропосферных задержек должен быть не менее 1 ч.

Сравнение разностей оценок тропосферных задержек с модельными значениями для осеннего и зимнего периодов не превышают 5 – 10 см, а для весеннего и летнего периодов – 20 – 25 см.

Настоящая работа выполнена при частичном финансировании по договору №ДЗ/467-2011 с Держинформнаукой Украины.

Авторы выражают благодарность научному руководителю, к.т.н. Жалило А.А., за полезные замечания и рекомендации, способствующие улучшению материалов статьи, а также к.т.н. Горбу А.И., директору НПП "Навигационно-геодезический центр" за предоставленные ГНСС наблюдения для проведения экспериментальных исследований.

Список литературы: 1. Гофманн-Велленгоф Б. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтнеггер, Д. Коллінз, пер. з англ.. під ред. Я.С. Яцківа. – Київ : Наук. думка.- 1995. – 380 с. 2. Schüler T. On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation Dissertation, Schriftenreihe 73, Studiengang Geodäsie und Geoinformation, Universität der Bundeswehr München, February 2001. – 364 p. 3. F. K. Brunner Tropospheric propagation effects in GPS height results using meteorological observations/ Brunner F. K., Tregoning P. // Aust.J.Geod.Photogram.Surv. No.60, – June 1994, – pp. 49-65. 4. Niell A. E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths / A.E. Niell // Journal of Geophysical Research, vol. 101, no. B2. – 1996. – pp. 3227-3246. 5. A.H. Dodson, Assessment of EGNOS Tropospheric Correction Model / Dodson A.H., Chen W., Baker H.C., Penna N.T., Roberts G.W., Jeans R. J. and Westbrook J. // Proceedings of the 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1999). – September 14 – 17 1999, Nashville, TN, – pp. 1401 – 1408. 6. Yi Zheng Interpolating Residual Zenith Tropospheric Delays for Improved Wide Area Differential GPS Positioning / Zheng Yi // Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004). – September 21 – 24, 2004. – Long Beach, CA, – pp. 915 – 924. 7. Davis, J. L. The effect of turbulence on atmospheric gradient parameters estimated from ground-based radiometric and space geodetic measurements. Geophysical Research Letters. – 1992. – Vol. 19, pp. 2183-2186.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 03.03.2013