

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ОДНОЧАСТОТНОГО ГНСС-ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПУТЕМ СЕТЕВОЙ КОРРЕКЦИИ ИОНОСФЕРНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

### Введение

При реализации технологий высокоточного позиционирования в дифференциальном режиме по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) необходимо учитывать множество факторов: тип используемого оборудования для проведения измерений (одно-, двухчастотное), режим позиционирования (RTK – Real Time Kinematic, постобработка), характеристики сети референчных (базовых) ГНСС-станций и др. Учитывая, что пользовательский парк одночастотной аппаратуры в Украине составляет 80 – 90 % эксплуатируемого геодезического ГНСС оборудования, актуальной и имеющей большую практическую значимость для большинства ГНСС-приложений является задача достижения сантиметрового уровня точности с использованием относительно недорогого одночастотного ГНСС-оборудования.

Известно, что одним из главных факторов, затрудняющих решение задач высокоточного ГНСС-позиционирования, являются проблемы точного учета задержки распространения сигналов в слоях тропосферы и ионосферы. Наибольший вклад в погрешности одночастотных наблюдений кодовых и фазовых псевдодальностей вносят ионосферные задержки. Многочисленные результаты исследований, выполненных в мире в последние два десятилетия (см., например, работы [1 – 5]), показали, что достижение сантиметровой точности координатных определений возможно только при условии эффективной компенсации ионосферной задержки навигационных сигналов. Данная проблема подтвердилась и в результатах исследований сотрудников научно-исследовательской лаборатории «Спутниковые сетевые технологии высокоточного местоопределения» кафедры «Основ радиотехники» Харьковского национального университета радиоэлектроники (ХНУРЭ). Таким образом, появилась необходимость провести отдельные исследования путей уменьшения ионосферной составляющей погрешности измерений одночастотного ГНСС-оборудования за счет использования наблюдений разреженных сетей станций (с межбазовыми расстояниями ~200 км) в условиях удаления потребителей от ближайшей станции ~100 км и более. Следует отметить, что эта задача актуальна при обработке как одночастотных измерений, так и двухчастотных. Так, при реализации технологий точного позиционирования реального времени (RTK – Real Time Kinematic) на базовых расстояниях свыше 30 – 50 км в условиях усиления ионосферных возмущений и, соответственно, усиления пространственно-временной декорреляции ионосферных погрешностей значительно возрастает вероятность неверной фиксации фазовых неоднозначностей из-за возрастания погрешностей фазового решения на разностной частоте.

В настоящей работе приведены основные результаты исследований возможности эффективной компенсации ионосферных задержек ГНСС-наблюдений путем использования сетевых дифференциальных коррекций – интерполяции ионосферных комбинаций наблюдений сети двухчастотных ГНСС-станций, окаймляющих зону местонахождения потребителей. Такой подход облегчает моделирование и последующую оценку вариационных остаточных ионосферных погрешностей наблюдений.

### **О проблеме учета ионосферной составляющей погрешности координатных определений. Сетевая коррекция ионосферных погрешностей – предлагаемый подход**

Практически полностью учесть влияние ионосферы на задержку сигнала позволяет использование двухчастотного оборудования. В случае использования одночастотных ГНСС-приемников возможно несколько путей учета (компенсации) ионосферной задержки: а) применение коррекций с использованием трендовых ионосферных моделей [1 – 3, 6 – 8]; б) формирование и использование дифференциальных поправок (однобазовых или сетевых)

[1 – 5, 9, 10]; в) совместное оценивание (в случаях, когда это возможно и целесообразно) параметров моделей ионосферной задержки наряду с информационными параметрами местоположения [11].

Результаты многочисленных зарубежных и отечественных исследований в этой области показали, что ионосферная задержка может быть представлена несколькими составляющими: 1) долговременным медленноменяющимся трендом, 2) крупномасштабными сильно коррелированными во времени и пространстве медленно меняющимися вариациями, получившими название LSTIDs (Large-Scale Travelling Ionospheric Disturbances) и 3) среднемасштабными быстро перемещающимися вариациями MSTIDs (Medium-Scale Travelling Ionospheric Disturbances) [4, 5]. Последняя составляющая (MSTIDs) наиболее изменчива, наиболее подвижна и практически не поддается моделированию [4]. Получившие широкое применение модели компенсации ионосферных задержек Klobuchar и GIM IONEX [1 – 3, 6 – 8] позволяют с определенной степенью точности компенсировать только трендовую составляющую ионосферной задержки и не учитывают вариационную составляющую процессов, происходящих в реальной ионосфере [4]. Однако именно вариационная составляющая ионосферной задержки является преобладающей (величины изменений могут лежать в пределах 5 – 50 см) по сравнению с трендовой (величины изменений обычно не превышают 5 – 15 см для двойных разностей фазовых наблюдений на базовых расстояниях до 200 км) [4, 5, 8].

Выполненные в 2010 – 2012 гг. исследования [7, 8] позволили определить степень воздействия и вклад составляющих ионосферной задержки на надежность и точность дифференциального одночастотного (L1) ГНСС-позиционирования сантиметровой точности при работе с наблюдениями ГНСС-сетей перманентных референционных станций различного размера – с межбазовыми расстояниями от 50 до 250 км.

Результаты оценки точности модельной компенсации регулярной составляющей ионосферной задержки (трендовая и LSTID составляющие) показали, что для достижения минимального уровня остаточной погрешности компенсации целесообразно использовать измерительную информацию сети двухчастотных ГНСС-станций, окаймляющих зону местонахождения потребителей для построения точных локальных моделей (например, VRS/FKP-типа [9 – 11]).

На основе полученных результатов был предложен следующий порядок обработки наблюдений для эффективной оценки/компенсации ионосферной погрешности за счет использования ГНСС-наблюдений сети базовых станций:

1) обработка ГНСС-наблюдений сети ближайших базовых станций (пре-процессинг, разрешение фазовой неоднозначности (РФН) [1 – 3]);

2) оценивание линейной комбинации (ЛК) «Geometry-Free» фазовых однозначных ГНСС-наблюдений (т.н. двойных разностей фазовых наблюдений [1 – 3]);

3) с использованием разработанных алгоритмов т.н. «детрендинга» [4, 8] и оценки вариационных составляющих ионосферной задержки формируются данные для интерполяции двойных разностей ионосферных задержек на местоположение «роверных» приемников потребителей; компенсация ионосферной погрешности одночастотных наблюдений потребителей с использованием результатов интерполяции двойных разностей ионосферных задержек двухчастотных референционных станций сети;

4) подбор полиномиальных моделей вариаций ионосферных задержек по сформированным интерполяционным сетевым коррекциям, включение этих моделей в уравнения одночастотных фазовых наблюдений и совместная оценка ионосферных вариаций (в форме коэффициентов полиномов) и информационных параметров (координат, расхождений шкал времени и параметров фазовой неоднозначности).

**Уравнения фазовых ГНСС-наблюдений и используемые линейные комбинации. Алгоритм разделения трендовой и вариационной составляющих ионосферной задержки – «детрендинг»**

В упрощенном виде математическую модель фазовых наблюдений двух частот (для приёмника с порядковым индексом  $i$  и моментом времени приёма  $t_k$ , т.е. моментом форми-

рования измерений в приёмнике в шкале времени ГНСС; спутника с порядковым индексом  $j$ ) можно представить как [1 – 3]:

$$\begin{cases} \hat{L}_{1,i}^j(t_k) = F_i^j(t_k) - I_i^j(t_k) + (b_{\phi 1,i} - B_{\phi 1}^i) - M_{1,i}^j \cdot \lambda_1 + \delta \tilde{L}_{1,i}^j(t_k) \\ \hat{L}_{2,i}^j(t_k) = F_i^j(t_k) - \gamma^2 I_i^j(t_k) + (b_{\phi 2,i} - B_{\phi 2}^i) - M_{2,i}^j \cdot \lambda_2 + \delta \tilde{L}_{2,i}^j(t_k) \end{cases} \quad (1)$$

где  $F_i^j(t_k) = R_i^j(t_k) + [\Delta_i^{GPS} - \Delta^{j,GPS}] + Tr_i^j(t_k)$ ; – функция, включающая в себя частотно-независимые переменные (геометрические расстояния  $R_i^j(t_k)$ ), расхождение шкал времени приемника и ГНСС  $\Delta_i^{GPS}$ , уходы бортовых часов спутников относительно шкалы ГНСС  $\Delta^{j,GPS}$ , тропосферную задержку сигналов  $Tr_i^j(t_k)$ );

$R_i^j(t_k)$  – расстояние между фазовым центром антенны  $i$ -го приёмника и фазовым центром антенны  $j$ -го спутника;

$$R_i^j(t_k) = \sqrt{[x_i(t_k) - \hat{X}_{j(i)}(t_k(t_i^T))]^2 + [y_i(t_k) - \hat{Y}_{j(i)}(t_k(t_i^T))]^2 + [z_i(t_k) - \hat{Z}_{j(i)}(t_k(t_i^T))]^2};$$

$x_i, y_i, z_i$  – известные (или неизвестные) координаты приемника;

$\hat{X}_{j(i)}, \hat{Y}_{j(i)}, \hat{Z}_{j(i)}$  – эфемериды  $j$ -го спутника, вычисленные на момент излучения навигационных сигналов относительно времени приема  $i$ -м приемником.

$I_i^j(t_k)$  – ионосферная задержка сигналов в наблюдениях на частоте L1 GPS

( $f_{L1} = 1575,42$  МГц,  $f_{L2} = 1227,6$  МГц);

$\gamma^2 = \frac{f_{L1}^2}{f_{L2}^2} = \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2}$  – коэффициент пересчета ионосферной задержки для частоты L2;

$b_{\phi 1,i}, B_{\phi 1}^i, b_{\phi 2,i}, B_{\phi 2}^i$  – фазовые ( $\Phi 1, \Phi 2$ ) аппаратные задержки в трактах приёмников  $b$  и спутников  $B$ ;

$M_{1,2i}^j = N_{1,2i}^j + (\phi_{0i} - \phi_0^j)$ ;  $\phi_{0i}$  – случайная начальная (в циклах) фаза опорного генератора  $i$ -го приемника, а  $\phi_0^j$  –  $j$ -го спутника;

$\delta \tilde{L}_{1,i}^j(t_k)$  – погрешности фазовых наблюдений, обусловленные шумами и многолучевостью.

В практике обработки фазовых ГНСС-наблюдений применяется их линейное комбинирование для уменьшения погрешностей (дифференциальный метод), выделения ионосферных задержек (т.н. «безгеометрические» Geometry-Free линейные комбинации), формирования упрощенных комбинаций уравнений с компенсацией тех или иных неизвестных (т.н. одинарные и двойные разности наблюдений) и др. Перечисленные линейные комбинации (ЛК) и их свойства детально описаны в многочисленных источниках, в частности в фундаментальных монографиях [1 – 3]. Ниже приведены используемые в данной работе ЛК без детального их описания.

Способ формирования одинарных разностей наблюдений показан на рис. 1.

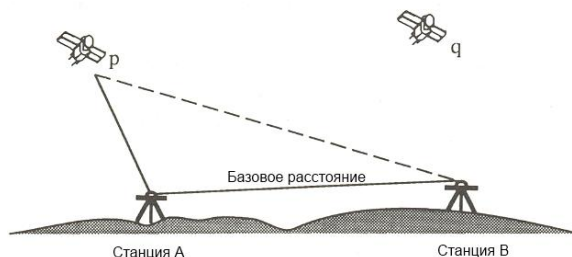


Рис. 1. Формирование одинарных разностей

Обозначим пункты приема сигналов спутников как  $A$  и  $B$ , спутник – как  $p$ , и, используя упрощенную форму записи фазовых псевдодальностей на частоте L1 GPS (см. формулы (1)), запишем выражение (3) для одинарных разностей наблюдений (реализация классического дифференциального метода):

$$\begin{aligned}\hat{L}_{1,A}^p(t_k) &= F_A^p(t_k) - I_A^p(t_k) + (b_{\varphi 1,A} - B_{\varphi 1}^i) - N_{1,A}^p \cdot \lambda_1 + (\phi_{0,A} - \phi_0^p) \cdot \lambda_1 + \delta \tilde{L}_{1,A}^p(t_k) \\ \hat{L}_{1,B}^p(t_k) &= F_B^p(t_k) - I_B^p(t_k) + (b_{\varphi 1,B} - B_{\varphi 1}^i) - N_{1,B}^p \cdot \lambda_1 + (\phi_{0,B} - \phi_0^p) \cdot \lambda_1 + \delta \tilde{L}_{1,B}^p(t_k)\end{aligned}\quad (2)$$

$$\Delta \hat{L}_{1,AB}^p(t_k) = \Delta F_{AB}^p(t_k) - \Delta I_{AB}^p(t_k) + \Delta b_{\varphi 1,AB} - \Delta N_{1,AB}^p \cdot \lambda_1 + \Delta \phi_{0,AB} \cdot \lambda_1 + \delta \tilde{L}_{1,AB}^p(t_k)\quad (3)$$

Формирование данной разности позволяет устранить погрешности, связанные с уходами шкал времени спутников от системной шкалы ГНСС и бортовыми аппаратными задержками. Кроме того, одинарные разности (дифференциальный метод) позволяют уменьшить эфемеридные, тропосферные и ионосферные составляющие погрешностей наблюдений.

На рис. 2 показан способ формирования двойных разностей наблюдений. В данном случае имеем два пункта измерений  $A$  и  $B$ , и два спутника –  $p$  и  $q$  (рис. 2).

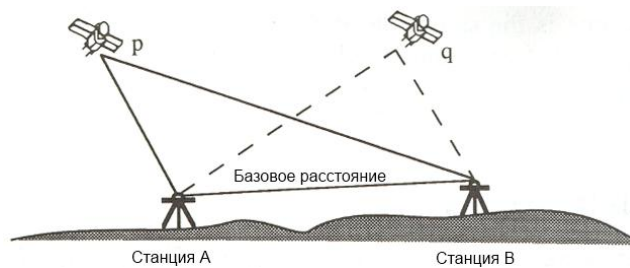


Рис. 2. Формирование двойных разностей наблюдений

Тогда

$$\begin{aligned}\Delta \hat{L}_{1,AB}^p(t_k) &= \Delta F_{AB}^p(t_k) - \Delta I_{AB}^p(t_k) + \Delta b_{\varphi 1,AB} - \Delta N_{1,AB}^p \cdot \lambda_1 + \Delta \phi_{0,AB} \cdot \lambda_1 + \delta \tilde{L}_{1,AB}^p(t_k) \\ \Delta \hat{L}_{1,AB}^q(t_k) &= \Delta F_{AB}^q(t_k) - \Delta I_{AB}^q(t_k) + \Delta b_{\varphi 1,AB} - \Delta N_{1,AB}^q \cdot \lambda_1 + \Delta \phi_{0,AB} \cdot \lambda_1 + \delta \tilde{L}_{1,AB}^q(t_k)\end{aligned}\quad (4)$$

$$\nabla \Delta \hat{L}_{1,AB}^{pq}(t_k) = \nabla \Delta F_{AB}^{pq}(t_k) - \nabla \Delta I_{AB}^{pq}(t_k) - \nabla \Delta N_{1,AB}^{pq} \cdot \lambda_1 + \delta \tilde{L}_{1,AB}^{pq}(t_k)\quad (5)$$

В двойных разностях наблюдений исключаются неизвестные переменные, обусловленные сдвигами шкал времени, а также дополнительно уменьшаются трендовые составляющие тропосферных и ионосферных погрешностей наблюдений. При этом погрешности двойных разностей наблюдений становятся сильно коррелированными, что обязательно необходимо учитывать при их обработке.

При исследованиях ионосферных задержек обычно используют «безгеометрические» Geometry-Free (GF) линейные комбинации. Эти комбинации фазовых наблюдений позволяют выделить ионосферные задержки с высокой точностью и использовать их для исследования, компенсации и моделирования ионосферных эффектов на обеих несущих частотах, пользуясь известными свойствами ионосферы в рассматриваемом частотном диапазоне функционирования ГНСС и известными зависимостями величины задержки от частоты. При этом, если в ходе обработки фазовых наблюдений решена задача РФН, то двойные разности комбинации GF содержат полную информацию об ионосферной задержке. Запишем ЛК GF для двойных разностей фазовых наблюдений:

$$\begin{aligned}\nabla \Delta \hat{L}_{1,AB}^{pq}(t_k) &= \nabla \Delta F_{AB}^{pq}(t_k) - \nabla \Delta I_{AB}^{pq}(t_k) - \nabla \Delta N_{1,AB}^{pq} \cdot \lambda_1 + \delta \tilde{L}_{1,AB}^{pq}(t_k) \\ \nabla \Delta \hat{L}_{2,AB}^{pq}(t_k) &= \nabla \Delta F_{AB}^{pq}(t_k) - \nabla \Delta I_{AB}^{pq}(t_k) - \nabla \Delta N_{2,AB}^{pq} \cdot \lambda_1 + \delta \tilde{L}_{2,AB}^{pq}(t_k),\end{aligned}\quad (6)$$

$$\nabla \Delta \hat{L}_{1,AB}^{pq}(t_k) - \nabla \Delta \hat{L}_{2,AB}^{pq}(t_k) = \nabla \Delta I_{AB}^{pq}(t_k) \cdot (\gamma^2 - 1) + \nabla \Delta N_{2,AB}^{pq} \cdot \lambda_2 - \nabla \Delta N_{1,AB}^{pq} \cdot \lambda_1 + \delta \tilde{L}_{12,i}^{pq}(t_k)\quad (7)$$

Таким образом, сформированные двойные разности оценок ЛК GF (при условии выполнения РФН, т.е. при известных значениях  $\nabla\Delta N_{2,AB}^{pq}$  и  $\nabla\Delta N_{1,AB}^{pq}$ ) содержат информацию об ионосферной задержке, суммарные шумы и многолучевость фазовых наблюдений обеих частот.

Теперь, используя наблюдения одинарных и двойных разностей комбинаций GF сети референционных станций, можно для целей анализа и дальнейшего использования разделить медленно меняющиеся (трендовые) и вариационные составляющие дифференциальных ионосферных задержек. Для этого был разработан оригинальный алгоритм «детрендинга», который реализуется следующим образом.

1) Рассчитываются разности ионосферных задержек по наблюдениям двух референционных станций. Полученные разностные ионосферные задержки будут содержать разностные MSTID, LSTID и трендовую ионосферные компоненты.

2) Остаточные трендовая и LSTID-компоненты ионосферной задержки оцениваются и устраняются с использованием полиномиальных зависимостей. Порядок аппроксимирующего полинома разностной ионосферной задержки подбирается в зависимости от длительности интервала наблюдений. В результате этого действия выделяется разностная MSTID- ионосферная компонента.

3) Для выделения MSTID-ионосферной компоненты для каждой референционной ГНСС-станции отдельно реализуется итерационный подход при аппроксимации исходных («неразностных») ионосферных задержек (оценок ЛК GF) и последующего расчета их разностей. Критерием выбора оптимального порядка аппроксимирующего полинома является минимум среднего значения остаточной суммы квадратов (RSS) невязок между выделенными вариациями, оцененными в п.п. 1), 2), и разностями вариаций ионосферных задержек, которые получены при аппроксимации исходных («неразностных») ионосферных задержек.

### Исходные данные для проведения экспериментальных исследований

Для проведения исследований использованы результаты реальных GPS-наблюдений перманентных референционных станций на средних (от 100 до 170 км) базовых расстояниях (см. рис. 3) на территории Киевской, Черниговской и Черкасской областей. В частности, были использованы данные двухчастотных приемников украинской сети перманентных IGS/EPN станций, находящихся под управлением ГАО НАН Украины (станции GLSV, PRYL, SMLA). В качестве «роверных» использовались двухчастотные ГНСС-приемники (пункты «BOBR» и «SHDA») с кинематическим и статическим участками наблюдений. Наблюдения выполнялись в декабре (345 – 346-е GPS сутки) 2008 г.

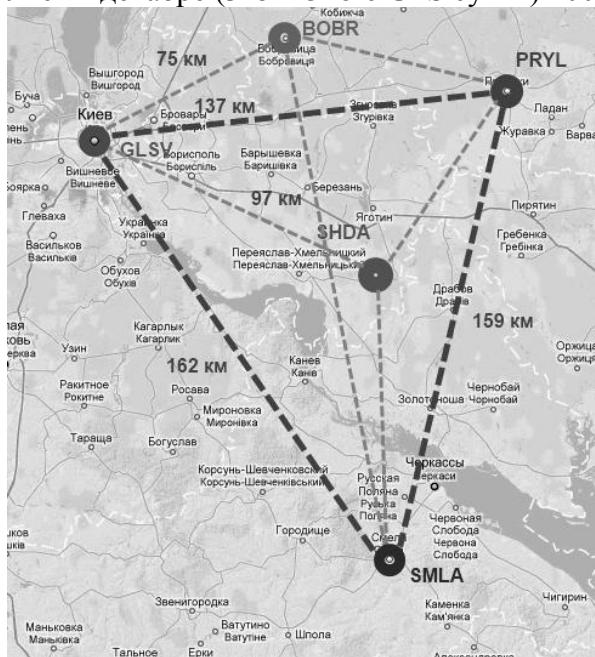


Рис. 3. Карта расположения референционных станций и роверных приемников потребителей

Все зарегистрированные наблюдения прошли предварительную обработку с использованием отечественного программно-алгоритмического комплекса (ПАК) OSTAВА\_PPA [12] (совместная разработка специалистов ГАО НАН Украины и ХНУРЭ). В ходе предварительной обработки двухчастотных наблюдений были исключены аномальные наблюдения, устранены циклические фазовые скачки, данные приведены к целым GPS секундам, осуществлены необходимые коррекции. Далее была решена задача разрешения начальных фазовых неоднозначностей двойных разностей фазовых наблюдений, что позволило сформировать и исследовать «безгеометрические» GF линейные комбинации для всех базовых линий, показанных на рис. 3.

Измерения на пункте «SHDA» проводились примерно 1 ч с момента 13 ч 46 мин, а на пункте «BOBR» – примерно 3 ч с момента 13 ч 46 мин по местному времени. За указанный интервал наблюдений в зоне радиовидимости находилось 11 спутников.

### Результаты исследований пространственно-временных свойств вариационных составляющих ионосферных задержек

Для определения вклада ионосферной задержки при дифференциальном одночастотном (L1) ГНСС-позиционировании вначале были проведены расчеты «бестрендовых» линейных комбинаций GF (на частоте L1) – «нулевых» и одинарных разностей. Примеры представлены на рис. 4, 5.

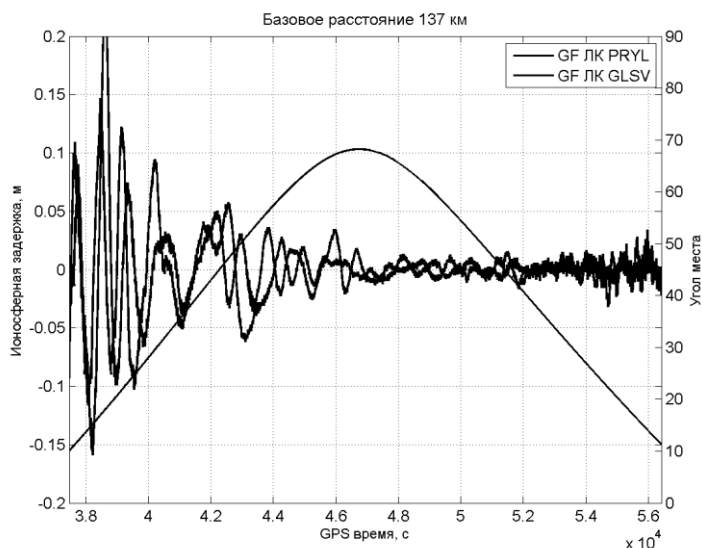


Рис. 4. Пример «бестрендовых» «нулевых» разностей ионосферной задержки для станций PRYL и GLSV, спутник SV18

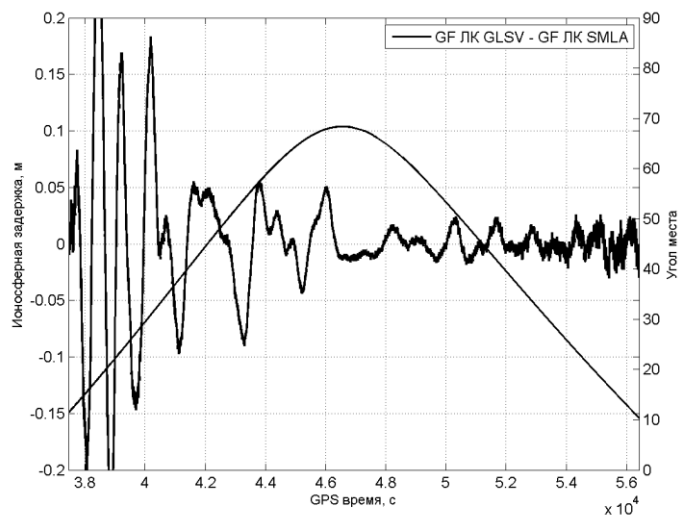


Рис. 5. Пример «бестрендовых» одинарных разностей ионосферной задержки для станций PRYL и GLSV, спутник SV18

В ходе исследований выполнена оценка уровня пространственно-временной корреляции вариационной составляющей ионосферных задержек с использованием разработанного алгоритма «детрендинга» GF-наблюдений указанных выше референчных станций и «роверных» приемников. Примеры вариационных составляющих ионосферной задержки для различных комбинаций референчных станций и «роверных» пунктов представлены на рис. 6.

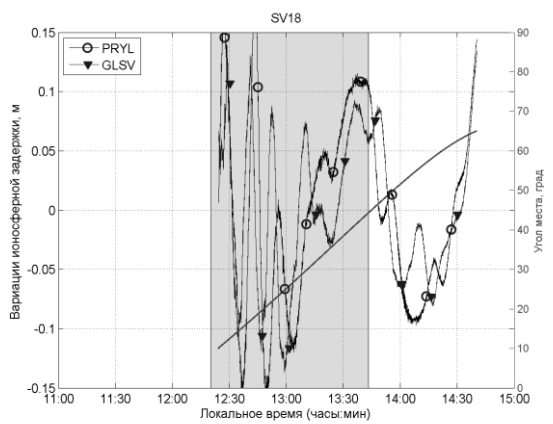
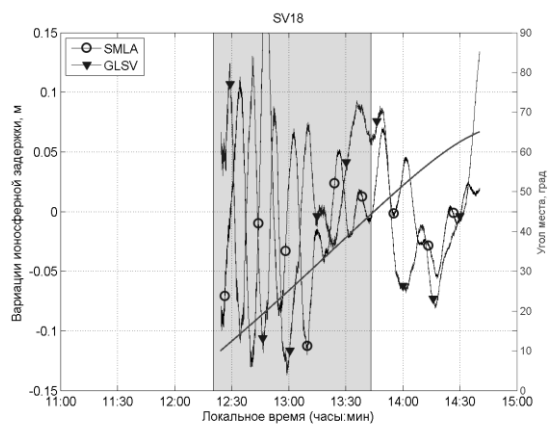
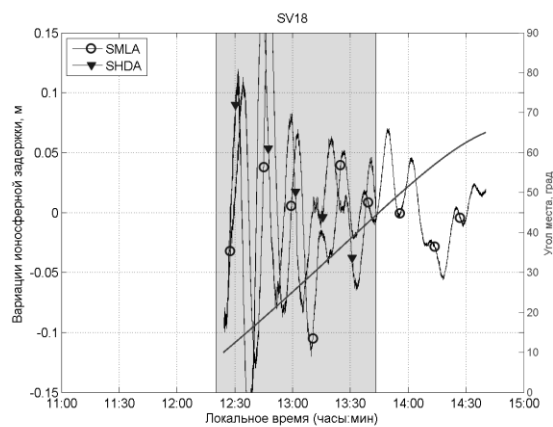
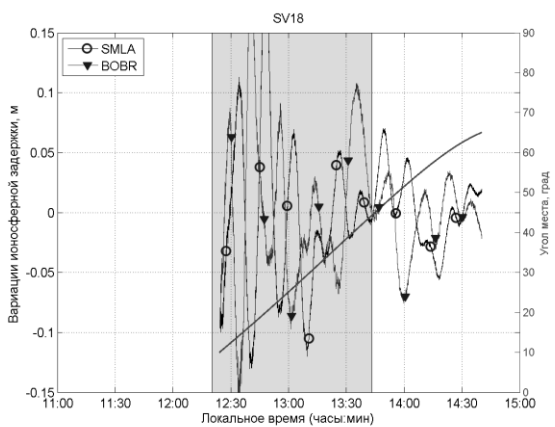
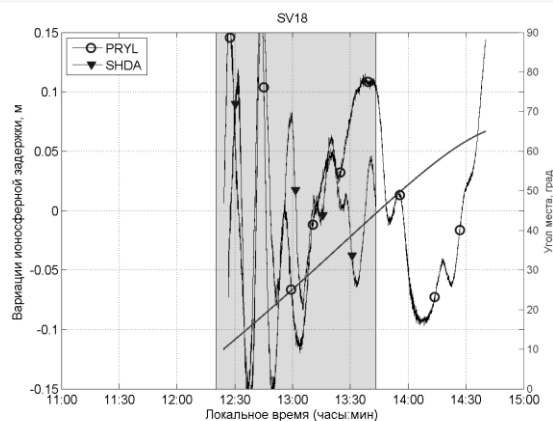
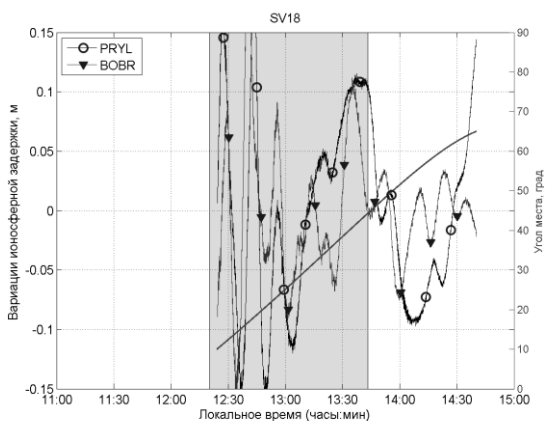
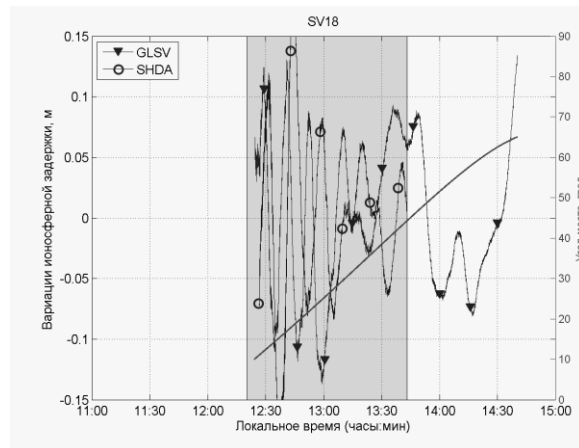
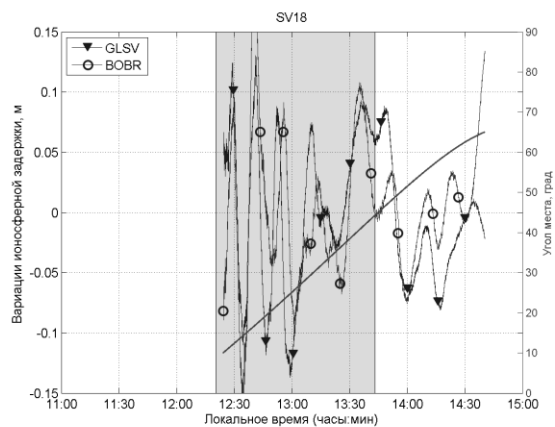


Рис. 6. Вариационные составляющие ионосферной задержки для различных комбинаций референчных станций и «роверных» пунктов

Проведенные исследования и их анализ позволили сделать следующие выводы.

Пространственная корреляция трендовой и LSTIDs составляющих ионосферных задержек для рассмотренных базовых расстояний (100 – 250 км) является существенной, что позволяет ожидать высокую эффективность компенсации этих ионосферных составляющих при реализации как однобазового, так и сетевого методов дифференциальной коррекции ГНСС-наблюдений; остаточные погрешности компенсации медленноменяющихся составляющих ионосферной задержки на базовых расстояниях до 200 км невелики и находятся в пределах 5 – 15 см. Кроме того, эти остаточные погрешности могут быть в некоторой степени уменьшены с использованием трендовых глобальных ионосферных моделей Klobuchar или GIM IONEX;

Вариационная MSTID-составляющая характеризуется периодами вариаций 5 – 20 мин и уровнями вариаций ~5 – 30 см, на средних и больших базовых расстояниях (более 50 – 80 км) очень изменчива и не может компенсироваться с использованием дифференциального метода и/или «трендовых» ионосферных моделей, что принципиально ограничивает точностные возможности L1-позиционирования. На небольших базовых расстояниях до 15 – 50 км MSTID-вариации сильно коррелированы и могут быть очень уменьшены с использованием одинарных и двойных разностей наблюдений (дифференциальный режим).

Исследования временной корреляции (на смежных сутках) составляющих ионосферной задержки показали, что прогнозировать суточные изменения ионосферных составляющих (особенно вариации LSTID и MSTID) с достаточной точностью невозможно и для достижения необходимой точности требуется реализация иных способов уменьшения ионосферных погрешностей, в частности путем использования измерительной информации сети двухчастотных станций, окаймляющих зону работы потребителей и построения моделей, учитывающих как остатки медленноменяющихся крупномасштабных ионосферных неоднородностей (трендовая и LSTID составляющие), так и вариационную MSTID-составляющую.

#### **Компенсация ионосферных погрешностей наблюдений потребителей путем интерполяции/экстраполяции ионосферных задержек двухчастотных референчных станций – сетевая ионосферная коррекция**

Компенсация ионосферных погрешностей наблюдений потребителей с использованием сетевой ионосферной коррекции осуществляется путем интерполяции/экстраполяции ионосферных задержек двухчастотных референчных станций. Сама по себе эта процедура известна и используется при реализации RTK технологий сетевой дифференциальной коррекции VRS/ФКР/МАС-типа (см., например, работы [9, 10]). Однако эти технологии применяются только для двухчастотного позиционирования и эффективны при работе в зоне сгущенных сетей станций с межбазовыми расстояниями 50 – 70 км, т.е. при удалении роверных приемников на расстояния до ~35 – 40 км от ближайшей базовой станции сети. В разреженных сетях, когда межбазовые расстояния достигают 150 – 250 км, именно из-за вариаций ионосферных задержек, в зимний период и особенно в условиях повышенной ионосферной активности надежность разрешения фазовой неоднозначности и точность позиционирования как однобазового, так и сетевого методов дифференциальной коррекции заметно уменьшаются. Тем не менее, сетевой метод коррекции, как один из действенных способов уменьшения погрешностей позиционирования, представляет значительный интерес с точки зрения исследования свойств сетевых ионосферных коррекций, формируемых в условиях разреженных сетей. Интерес представляет компенсация как вариационных составляющих, так и медленноменяющихся трендовых составляющих ионосферных задержек, сильно коррелированных по пространству и времени. С этой целью был разработан и протестирован соответствующий интерполяционный алгоритм, с использованием описанных выше исходных данных выполнена оценка точности сетевой компенсации ионосферных погрешностей наблюдений и проведен анализ возможности использования результатов интерполяции для моделирования



и совместной оценки ионосферных вариаций и информационных параметров (координат, расхождений шкал времени и параметров фазовой неоднозначности).

Разработанный алгоритм интерполяции двойных разностей ионосферных задержек референчных станций в зоне покрытия сети, аналогичный известным алгоритмам [9, 10], включает несколько этапов обработки наблюдений:

- выполняется предварительная обработка (пре-процессинг) наблюдений референчных станций и «роверных» приемников потребителей с последующим разрешением фазовых неоднозначностей на базовых линиях сети;

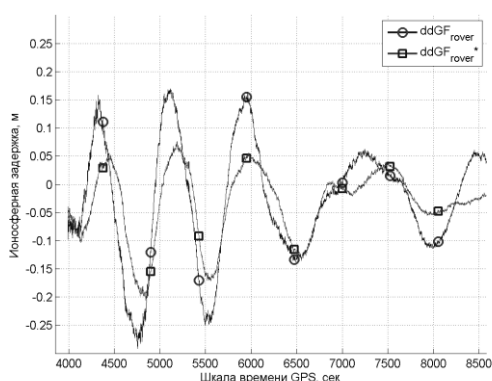
- с использованием оценок фазовых неоднозначностей формируются двойные разности «безгеометрических» линейных комбинаций GF (для частоты L1);

- одним из известных способов формируются параметры пересчета текущих координат «роверных» приемников из гринвичской в местную систему координат и, по аналогии с [9, 10], выполняется линейная интерполяция/экстраполяция двойных разностей ионосферных задержек на текущее местоположение потребителей.

Оценка методических погрешностей, обусловленных тем, что высота «роверных» ГНСС-приемников в местной системе координат из-за кривизны Земли может заметно отличаться от высоты точек проекций местоположения потребителей на плоскость, образованную референчными станциями, показала, что эти погрешности могут достигать величин  $\sim 1$  мм на 1 км перепада высот, т.е., являются пренебрежимо малыми.

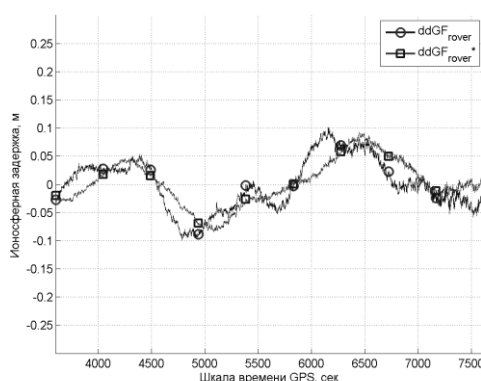
Для формирования коррекций использовались оценки ионосферных GF(L1) наблюдений на базовых линиях, образованных станциями, а подвергались коррекции оценки ионосферных GF(L1) наблюдений на базовых линиях «роверы»–станция (общая для всех базовых линий). Точность сетевой ионосферной коррекции оценивалась сравнением однозначных ионосферных погрешностей, отдельно оцененных по двухчастотным наблюдениям на базовых линиях «роверы»–станция, и результатов интерполяции ионосферных GF(L1) наблюдений, полученных на базовых линиях сети референчных станций. Сравнение проводилось отдельно для трендовых и вариационных составляющих ионосферных задержек.

Примеры результатов интерполяции ионосферных задержек на местоположение «роверного» приемника «SHDA» представлены на рис. 7 – 10, а результатов экстраполяции ионосферных задержек на местоположение приемника «BOBR» – на рис. 11 – 14. На рисунках показаны также оценки RSS приведенных ионосферных погрешностей и величина (в процентах) их уменьшения после ввода сетевых коррекций.



До ввода сетевых коррекций RSS=10,2 см

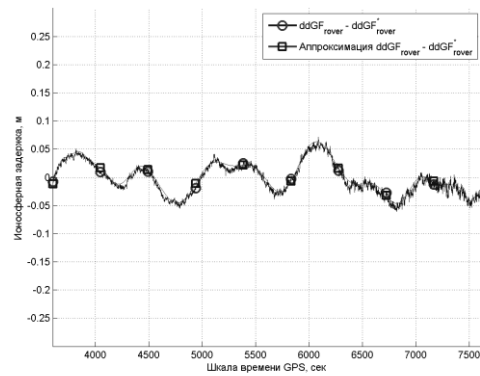
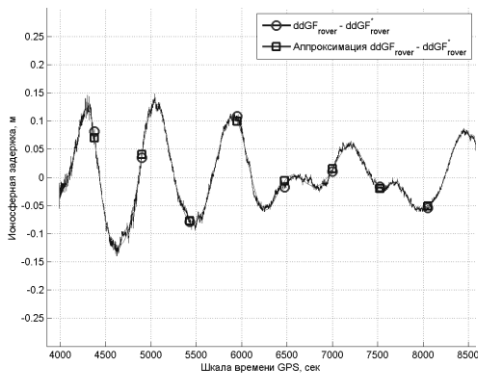
а



До ввода сетевых коррекций RSS=4,5 см

б

Рис. 7. Исходные и интерполированные двойные разности ионосферных задержек на базе «SHDA»-GLSV: а – для спутников SV18-SV21, б – для спутников SV10-SV21



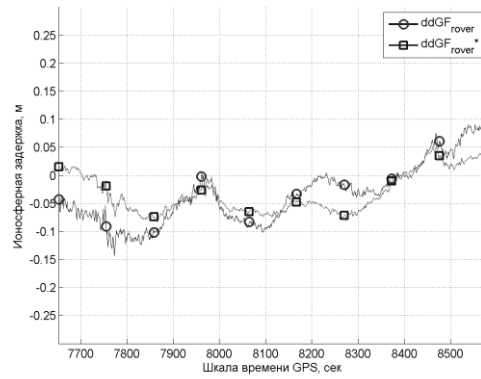
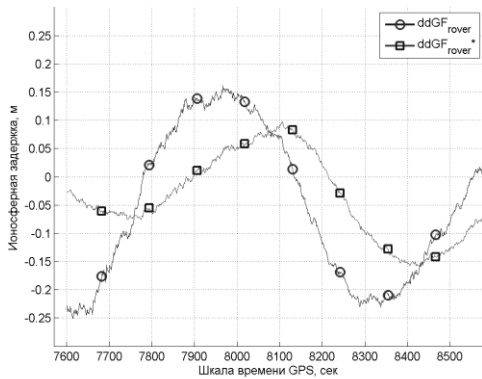
Уменьшение RSS после коррекций составило 39 %

Уменьшение RSS после коррекций составило 37 %

*a*

*б*

Рис. 8. Двойные разности ионосферных задержек после ввода сетевых коррекций и результаты их полиномиальной аппроксимации (использовались полиномы Лежандра) на базе «SHDA»-GLSV: *a* – для спутников SV18-SV21, *б* – для спутников SV10-SV21



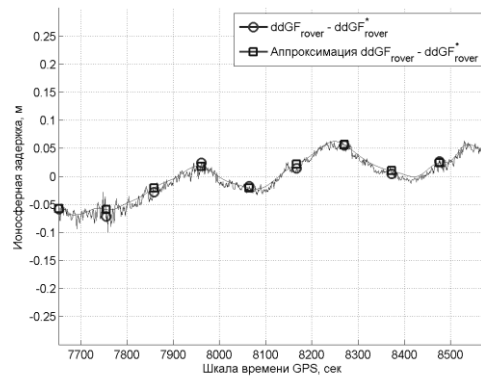
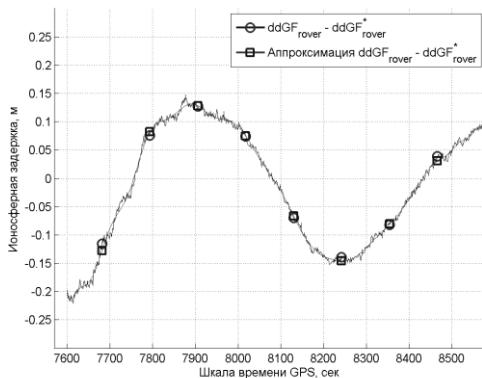
До ввода сетевых коррекций RSS=13,0 см

До ввода сетевых коррекций RSS=5,4 см

*a*

*б*

Рис. 9. Исходные и интерполированные двойные разности ионосферных задержек на базе «SHDA»-GLSV: *a* – для спутников SV15-SV21, *б* – для спутников SV22-SV21



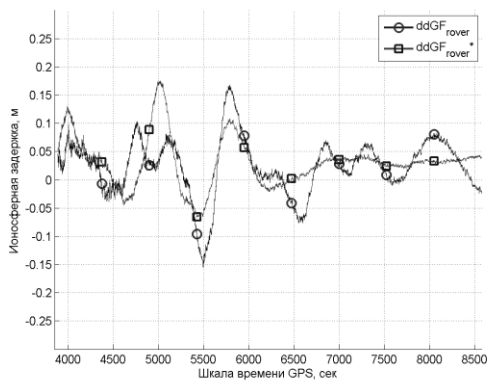
Уменьшение RSS после коррекций составило 23 %

Уменьшение RSS после коррекций составило 30 %

*a*

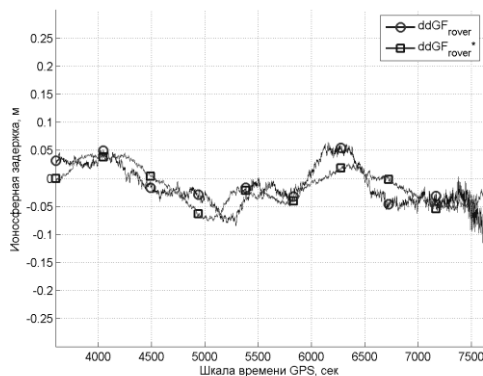
*б*

Рис. 10. Двойные разности ионосферных задержек после ввода сетевых коррекций и результаты их полиномиальной аппроксимации (использовались полиномы Лежандра) на базе «SHDA»-GLSV: *a* – для спутников SV15-SV21; *б* – для спутников SV22-SV21



До ввода сетевых коррекций RSS=5,1 см

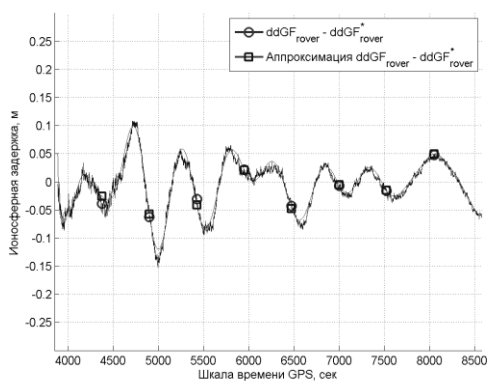
*a*



До ввода сетевых коррекций RSS=3,5 см

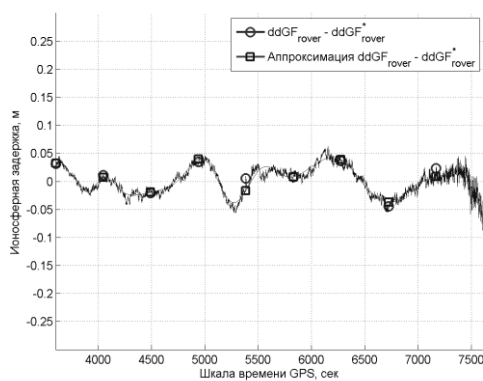
*б*

Рис. 11. Исходные и экстраполированные двойные разности ионосферных задержек на базе «BOBR»-GLSV: *a* – для спутников SV18-SV21, *б* – для спутников SV10-SV21



Уменьшение RSS после коррекций составило 16 %

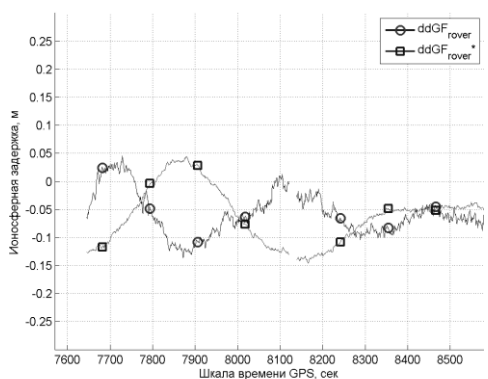
*a*



Уменьшение RSS после коррекций составило 31 %

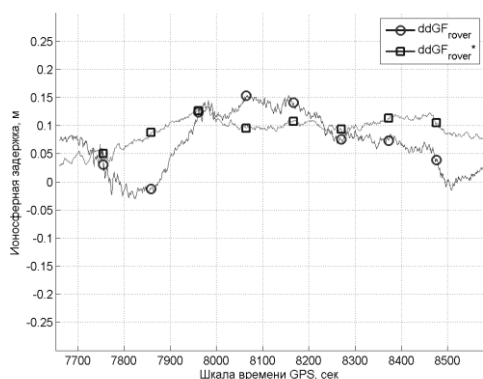
*б*

Рис. 12. Двойные разности ионосферных задержек после ввода сетевых коррекций и результаты их полиномиальной аппроксимации (использовались полиномы Лежандра) на базе «BOBR»-GLSV: *a* – для спутников SV18-SV21, *б* – для спутников SV22-SV21



До ввода сетевых коррекций RSS=5,1 см

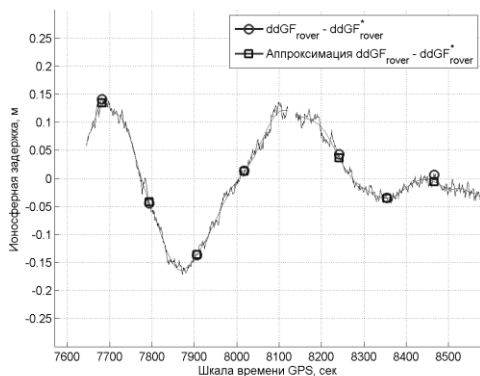
*a*



До ввода сетевых коррекций RSS=4,8 см

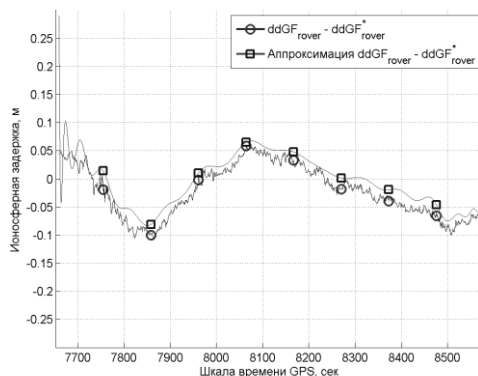
*б*

Рис. 13. Исходные и экстраполированные двойные разности ионосферных задержек на базе «BOBR»-GLSV :*a* – для спутников SV15-SV21, *б* – для спутников SV22-SV21



Увеличение RSS после коррекций составило 106%

а



Уменьшение RSS после коррекций составило 10%

б

Рис. 14. Двойные разности ионосферных задержек после ввода сетевых коррекций и результаты их полиномиальной аппроксимации (использовались полиномы Лежандра) на базе «BOBR»-GLSV: а – для спутников SV15-SV21, б – для спутников SV22-SV21

Анализ полученных результатов показал следующее.

Интерполяция ионосферной задержки (внутри зоны, ограниченной базовыми линиями референчных станций) позволяет практически полностью устранить трендовую компоненту ионосферной задержки (максимальные погрешности не превышают  $\sim 1$  см), а также позволяет заметно снизить уровень ионосферных вариаций (до  $\sim 40$  %).

Экстраполяция ионосферной задержки («роверы» вне зоны, ограниченной базовыми линиями референчных станций) позволяет с погрешностью, не превышающей 2 см, устранить трендовую компоненту ионосферной задержки, что больше, чем для случая интерполяции, но все же приемлемо, с точки зрения устранения трендовой составляющей. Важно также отметить, что компенсация вариационной составляющей ионосферной задержки уменьшилась и в среднем уменьшение результирующей погрешности достигает 20 – 30 %. Однако в некоторых случаях (см., например, рис. 13, 14) наблюдался заметный сдвиг исходных и интерполированных кривых (сдвиг составлял примерно половину периода MSTID-вариации – 150 – 200 с) и в таких случаях коррекция не уменьшает, а увеличивает (до 100 %) результирующие ионосферные вариации.

Как видно из примеров, представленных на рис. 8, 10, 12, 14, остаточные погрешности сетевой ионосферной коррекции поддаются очень точной полиномиальной аппроксимации (использовались полиномы Лежандра) на больших интервалах – от 15 мин до 1,5 ч. При этом точная аппроксимация (остаточные погрешности – на уровне шумов) возможна без использования свободного члена полинома, что дает принципиальную возможность совместно оценивать начальные фазовые неоднозначности, остальные коэффициенты аппроксимирующего остаточные ионосферные погрешности полинома и информационные параметры – текущие координаты и расхождения шкал времени приемников. Поэтому устранение трендовой компоненты ионосферной задержки, которое основано на использовании сетевой коррекции, играет принципиальную роль при реализации полного устранения ионосферных погрешностей одночастотных наблюдений. Здесь необходимо отметить, что указанный подход совместной оценки существенно расширенного вектора состояния требует отдельного исследования вопросов достижения устойчивого и более точного оценивания, прежде всего информационных параметров, по сравнению с традиционным подходом, не предполагающим возможность моделирования и оценки мешающих параметров совместно с информационными. Такие исследования условий достижения повышения точности статического и кинематического одночастотного позиционирования на больших базовых расстояниях в условиях разреженных ГНСС-сетей в настоящее время подходят к завершению и будут опубликованы в отдельной работе.

## Выводы

1. Трендовые (регулярные) составляющие ионосферных задержек для базовых расстояний 100 – 200 км могут быть эффективно компенсированы при реализации как однобазового, так и сетевого методов дифференциальной коррекции ГНСС-наблюдений. Вариационные перемещающиеся MSTID-составляющие ионосферных задержек, достигающие нескольких дециметров, на базовых расстояниях более 50 – 80 км не могут компенсироваться с использованием дифференциального метода и/или «трендовых» ионосферных моделей, и именно они принципиально ограничивают точность L1-позиционирования.

2. Предложены методика и алгоритмы обработки наблюдений для оценки/компенсации ионосферной погрешности путем использования наблюдений ГНСС-сетей: Экспериментальным путем доказана возможность значимой компенсации ионосферных задержек ГНСС-наблюдений путем использования сетевых дифференциальных коррекций – интерполяции ионосферных комбинаций наблюдений сети двухчастотных ГНСС-станций, окаймляющих зону местонахождения потребителей.

3. Интерполяция/экстраполяция ионосферной задержки позволяет практически полностью устранить трендовую компоненту ионосферной задержки и заметно (до 40 %) уменьшить уровень ионосферных вариаций, однако при экстраполяции возможны случаи, когда расчетная сетевая коррекция не уменьшает, а увеличивает результирующие ионосферные погрешности.

4. Применение линейной интерполяции/экстраполяции ионосферных задержек в конечном счете позволяет моделировать и затем оценивать (совместно с информационными параметрами и параметрами фазовой целочисленной неоднозначности) вариационные ионосферные погрешности. Такой подход имеет новые значимые перспективы повышения точности статического и кинематического одночастотного позиционирования на больших базовых расстояниях в условиях разреженных ГНСС-сетей.

**Список литературы:** 1. *Гофманн-Веллинггоф, Б.* Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія та практика: пер. з англ. / Б. Гофманн-Веллинггоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз; пер. з англ за ред. Я. С. Яцківа, – Київ : Наук. думка, 1996. – 380 с. 2. *Rizos Chris.* Principles and practice of GPS surveying // School of engineering, The University of New South Wales, Australia, 1999. – 555 p. 3. *Leick, A.* GPS Satellite Surveying, 3-rd ed., John Wiley – New York, 2003, 464 pp. 4. *Hernandez-Pajares, M., Juan, J.M. and Sanz, J.* Medium-scale traveling ionospheric disturbances affecting GPS measurements: Spatial and temporal analysis [электронный ресурс] / режим доступа [http://gage14.upc.es/WARTK-papers/2005JA011474\\_final.pdf](http://gage14.upc.es/WARTK-papers/2005JA011474_final.pdf). 5. *Hernández-Pajares, M., Juan, M.J., Sanz, J., Aragon-Angel, A., Ramos-Bosch, P., Odiak, D., Teunissen, P.J.G., Samson, J., Tossaint, M., Albertazzi, M., de Bakker, P., Verhagen, S., van der Marel, H.* Wide-Area RTK. High Precision Positioning on a Continental Scale // Inside GNSS, March/April 2010, pp. 35-46. 6. *ICD-GPS-200, Revision C, Initial relies* <http://www.navcen-uscg.gov/pubs/gps/icd200/ICD200Cw1234.pdf>. 7. *Желанов, А.А., Бессонов, Е.А.* Использование глобальных ионосферных карт IGS в задачах высокоточного ГНСС-позиционирования // Прикладная радиоэлектроника. – Харьков, 2011. – Т. 5, № 3. – С. 302-306. 8. *Жалило, А.А., Бессонов, Е.А.* О проблеме учета ионосферной задержки навигационных сигналов в задачах точного ГНСС-позиционирования // 4-й Междунар. радиоэлектрон. форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» – Харьков : ХНУРЭ, 2011. – Т. 1, №2. – С. 62 – 65. 9. *Al-Shaery, A., Lim, S., and Rizos, C.* Investigation of Different Virtual Reference Station Techniques / A. Al-Shaery, S. Lim, and C. Rizos // Journal of Global Positioning Systems (2010). - Vol.9, No.1. 10. *Takac, Frank, Zelzer, Oliver.* The Relationship Between Network RTK Solutions MAC, VRS, PRS, FKP and i-MAX," Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008), Savannah, GA, September 2008, pp. 348-355. 11. *Schüler, E., Torben Schüler, T.* Active GNSS Networks and the Benefits of Combined GPS + Galileo Positioning // Inside GNSS, November/December 2007, pp. 46-55. 12. *Zhalilo, A., Shelkovenkov, D.* (2007) Features and service performance of multifunctional software toolkit "OCTAVA" for processing and analysis of GPS/GNSS observations, GEOS 2007 Conference Proceedings, Prague, Czech Republic, 1st – 2nd March 2007, pp. 102-110.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 12.05.2012