

И.В. ДИЦКИЙ

РАЗРЕШЕНИЯ ФАЗОВОЙ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ДВУХЧАСТОТНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ФАЗОВЫХ ГНСС-НАБЛЮДЕНИЙ И ВЫСОКОТОЧНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ НА БАЗОВЫХ УДАЛЕНИЯХ ДО 1000 КМ

Введение

При выполнении высокоточных координатных определений с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) задача разрешения фазовой неоднозначности (РФН) традиционно решается с использованием дифференциального режима [1, 2]. Надежность решения задачи РФН в этом случае очень зависит от базового расстояния, поскольку с увеличением базового расстояния существенно возрастают остаточные систематические/медленно меняющиеся погрешности наблюдений. Это приводит к снижению надежности решения данной задачи и ограничению применимости традиционных алгоритмов РФН. Однако существует ряд задач, которые требуют выполнения высокоточных координатных определений на длинных базовых удалениях (~500 – 1000 км). Это разного рода мониторинговые задачи, задачи «привязки» референчных/базовых станций на отдаленных территориях, задачи атмосферных исследований и др. Так, например, для целей построения региональных/локальных тропосферных и ионосферных моделей могут использоваться базовые расстояния от 500 до 2000 км (например, для украинской сети базовые расстояния могут достигать 1000 км и более); при оценке абсолютных значений зенитных тропосферных задержек (ЗТЗ) по ГНСС-наблюдениям необходимо, чтобы хотя бы одна из сети станций, для которых выполняется оценка ЗТЗ, была вынесена за пределы сети не менее чем на 500 – 600 км [3], иначе точность оценки будет неудовлетворительной.

Задача РФН для указанных базовых удалений является сложной задачей. В мировой практике в открытом доступе имеется не много источников, где бы в полной мере описывалось решение указанной задачи. Имеющиеся алгоритмы имеют свои особенности и недостатки. Надежно работающие же методы и алгоритмы, которые используются в мировых программных брендах (например, «Bernese» [4]), являются интеллектуальной собственностью организаций-разработчиков и, как правило, детально не освещаются в открытых источниках.

Таким образом, актуально создание отечественных методов и алгоритмов РФН, которые способны надежно решать задачи РФН и точного дифференциального позиционирования на длинных базовых удалениях – до ~1000 км и более.

В данной работе описывается алгоритм надежного решения задачи РФН на длинных базовых удалениях и результаты его верификации на реальной измерительной ГНСС-информации. Разработанный алгоритм является модификацией ранее созданных отечественных алгоритмов РФН и позиционирования для базовых удалений до ~200 км, детально

описанных в [2]. Для надежного решения задачи РФН (оценка целочисленных начальных фазовых неоднозначностей) модифицированные алгоритмы предполагают использование известных кодово-фазовой линейной комбинации Melbourne-Wübbena и линейной фазовой комбинации «Iono-Free» [1, 5]. Оценка целочисленных неоднозначностей выполняется совместно с оценкой континуальных переменных – координат вынесенной станции, расхождений часов станций и зенитных тропосферных задержек на каждой из двух (вынесенной и референчной) станций.

Изложение материала ведется применительно к системе GPS (США). Однако это не ограничивает общность и применимость полученных результатов по отношению к близким

аналогам GPS – функционирующей системе ГЛОНАСС (РФ) и системам BeiDou–Compass (Китай) и Galileo (ЕС), которые находятся в стадии развертывания.

Методический подход к решению задачи

В работе [2] представлены результаты разработки и верификации прототипа программно-алгоритмического комплекса (ПАК) обработки ГНСС наблюдений, в основу которого легли усовершенствованный метод и алгоритмы разрешения фазовой неоднозначности дифференциальных статических и кинематических двухчастотных GPS-наблюдений и точного позиционирования на базовых расстояниях до ~200 км в различных условиях ионосферной активности. Экспериментальное тестирование показало, что указанные особенности метода, описанного в [2], позволяют надежно решить задачу РФН и достичь сантиметровой точности позиционирования. Однако с увеличением базовых расстояний возрастают остаточные погрешности многих источников погрешностей, которыми можно было пренебречь на базовых расстояниях до ~200 км, что приводит к снижению надежности РФН. К таким источникам погрешностей относятся: эфемериды, тропосферная задержка, ионосферная задержка, геодинамические эффекты. Также при обработке наблюдений на больших базовых удалениях необходимо учитывать с максимальной точностью и неравномерность фазовых характеристик антенн и межчастотные смещения их фазовых центров [1, 6].

Как было сказано выше, существует ряд актуальных задач требующих выполнения РФН на длинных базовых расстояниях. Поэтому была выполнена модификация и адаптация разработанных ранее алгоритмов [2] для условий работы на больших базовых расстояниях. Основные отличительные особенности модифицированных алгоритмов обработки наблюдений заключаются в следующем.

– Выполняется расчет и коррекция влияния ряда источников погрешностей, которыми нельзя пренебрегать на длинных базовых удалениях при использовании дифференциального режима. К ним относятся: расчет точных эфемерид спутников (с пересчетом на фазовый центр излучающей антенны); расчет геодинамических поправок (твердые, океанические и полярные приливы); учет вариаций фазовых центров антенн и различий между фазовыми центрами для двух частот (L1 и L2) сигналов ГНСС. Детальное описание указанных типов коррекций и алгоритмы их расчета приведено в работе [6].

– Из-за наличия больших остаточных модельных ионосферных погрешностей и невозможности их исключения из наблюдений, на этапе WL-решения вместо ЛК WL предложено использовать кодово-фазовую линейную комбинацию Melbourne-Wübbena (MW). Свойство этой линейной комбинации и алгоритм ее формирования описаны в диссертации [5]. Данная комбинация представляет собой линейную комбинацию кодовых наблюдений «Narrow Lane» (NL) [2, 5] и фазовых наблюдений «Wide Lane» (WL) [1, 2, 5]. Главным достоинством этой комбинации является то, что ее двойные разности являются только функцией от двойных разностей начальных фазовых неоднозначностей. Данное привлекательное свойство позволяет использовать ЛК MW для решения задач РФН практически на любых (до 4 тыс. км и более) базовых расстояниях.

– Экспериментально установлено, что на базовых удалениях 1000 км остаточные погрешности тропосферных задержек (при использовании модели MOPS) могут составлять от 10 до 70 см (на низких углах места), что существенно снижает надежность выполнения РФН, а в некоторых случаях вообще не позволяет решить указанную задачу. Поэтому для точного учета тропосферных задержек на этапе решения с использованием «безионосферных» Ionо Free [1, 2, 5]) комбинаций фазовых измерений зенитные тропосферные задержки (ЗТЗ) оцениваются совместно с другими параметрами (координатами, расхождениями шкал времени и начальными фазовыми неоднозначностями).

Модифицированный алгоритм предусматривает использование только двухчастотных кодовых и фазовых наблюдений и предназначен для обработки статических данных

продолжительностью не менее одного часа (в основном для обработки суточных данных перманентных референционных станций).

Перед началом решения задачи РФН необходимо выполнить предварительную обработку данных (контроль качества данных, приведение данных на целые секунды, устранение циклических фазовых скачков и т.д.). Для выполнения указанных задач использован программный комплекс OSTAВА_PPA [7].

Дальнейшая обработка выполняется по референчным участкам, длительность которых выбирается кратной одному часу. В пределах каждого участка проводится фильтрация данных по углу места менее 15 град и участков, длительность которых менее 15 мин.

Для повышения надежности выполнения РФН предложенный модифицированный алгоритм обработки наблюдений предполагает выполнение двухэтапной процедуры.

На первом этапе для решения задачи РФН используется кодово-фазовая линейной комбинации Melbourne-Wübbena. Запишем двойные разности ЛК MW:

$$\nabla\Delta\hat{\mu}^{jr}(t) = \nabla\Delta N_{WL}^{jr} \cdot \lambda_{WL} + \delta\nabla\Delta\mu^{jr}(t), \quad (1)$$

где $\nabla\Delta\hat{\mu}^{jr}(t)$ – двойные разности ЛК MW для «j-r» («r» – референционный спутник) спутник на момент времени t (текущая целая секунда системной шкалы времени GPS); $\nabla\Delta N_{WL}^{jr}$ – двойные разности начальных фазовых неоднозначностей ЛК WL для «j-r» спутник; λ_{WL} – длина волны ЛК WL (86,2 см); $\delta\nabla\Delta\mu^{jr}(t)$ – погрешности, обусловленные эффектами многолучевости распространения навигационных сигналов и шумами кодовых наблюдений (т.к. аналогичные фазовые погрешности меньше кодовых в 10 – 20 раз) для «j-r» спутник на момент времени t .

После формирования ЛК (1) оценка двойных разностей начальных фазовых неоднозначностей выполняется следующим образом:

$$\nabla\Delta\hat{N}_{WL}^{jr} = \left\{ \langle \nabla\Delta\hat{\mu}^{jr}(t) \rangle / \lambda_{WL} \right\}_{a.o.}, \quad (2)$$

где $\langle \rangle$ – операция математического ожидания; $\{ \}_{a.o.}$ – операция вычисления ближайшего целого.

В результате выполнения РФН с использованием комбинации Melbourne – Wübbena получаем двойные разности начальных фазовых неоднозначностей с длиной волны Wide Lane.

Для верификации правильности выполнения РФН на референчном участке формируются двойные разности линейной комбинации MW с вводом поправок на оцененные фазовые неоднозначности. Далее выполняется проверка: не выходит ли за заданный порог (подбирается эмпирически) среднее значение рассчитанных двойных разностей. Для спутников, для которых превышен порог, принимается решение о том, что РФН выполнено неверно и соответствующие данные удаляются.

На втором этапе решается задача РФН с использованием фазовой «безионосферной» линейной комбинации «Iono – Free» (IF) [1, 2, 5]. Исходная система уравнений для второго этапа обработки имеет вид

$$\begin{cases} \hat{\vec{X}}_{SL}(t) = \vec{X}(t) + \delta\vec{X}_{SL}(t) \\ \Delta\hat{L}_{IF}^j(t) = \Delta R^j(t) + \nabla\Delta T^{jr}(t) + \xi_{IF}(t) - \left[k_{IF1} \cdot \nabla\Delta N_1^{jr} \cdot \lambda_1 - k_{IF2} \cdot \nabla\Delta N_2^{jr} \cdot \lambda_2 \right] + \delta\Delta L_{IF}^j(t) \end{cases}, \quad (3)$$

где $\hat{\vec{X}}_{SL}(t) = \begin{pmatrix} \hat{x}_{SL}(t) \\ \hat{y}_{SL}(t) \\ \hat{z}_{SL}(t) \end{pmatrix}$ – вектор средних оценок координат пункта, полученных путем предварительного решения навигационной задачи на всем обрабатываемом участке наблюдений

с использованием сглаженных кодово-фазовых наблюдений [1, 8]; $\vec{X}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix}$ – вектор

искомых координат; $\delta\vec{X}_{SL}(t) = \begin{pmatrix} \delta x_{SL}(t) \\ \delta y_{SL}(t) \\ \delta z_{SL}(t) \end{pmatrix}$ – вектор погрешностей оценки $\hat{\vec{X}}_{SL}(t)$ с

известными статистическими характеристиками (предполагается, что известно среднее значение $\langle \delta\vec{X}_{SL}(t) \rangle = \vec{0}$ и корреляционная матрица $\mathbf{K}_{SL}(t) = \langle \delta\vec{X}_{SL}(t) \cdot \delta\vec{X}_{SL}^T(t) \rangle$); $\Delta\hat{L}_{IF}^j(t)$ – одинарные разности ЛК IF для «j-го» спутника на момент времени t (текущая целая секунда системной шкалы времени GPS); $\Delta R^j(t)$ – одинарные разности геометрических расстояний для j-го спутника на момент времени t [1, 2, 5]; $\nabla\Delta T^{jr}(t)$ – двойные разности тропосферных задержек; $\xi_{IF}(t) = \eta_{IF}(t) + \Delta T^r(t) - k_{IF_1} \cdot \Delta N_1^r \cdot \lambda_1 + k_{IF_2} \cdot \Delta N_2^r \cdot \lambda_2$ («r» – референцный спутник); $\eta_{IF}(t)$ – величина, включающая расхождения шкал времени, разность начальных фаз опорных генераторов «ровера» и референцной станции (РС), задержки сигналов двух частот в приемном тракте и «wind-up» эффект [6]; λ_1, λ_2 – длины волн несущих частот GPS (19.0 см и 24.4 см соответственно); k_{IF_1}, k_{IF_2} – коэффициенты преобразования ЛК IF для первой и второй частот соответственно ($k_{IF_1} = \frac{\lambda_2^2}{\lambda_2^2 - \lambda_1^2}, k_{IF_2} = \frac{\lambda_1^2}{\lambda_2^2 - \lambda_1^2}$); $\nabla\Delta N_1^{jr}, \nabla\Delta N_2^{jr}$ – двойные разности начальных фазовых неоднозначностей для первой и второй частот соответственно; $\delta\Delta L_{IF}^j(t)$ – погрешности одинарных разностей фазовых ЛК IF, вызванных шумами и многолучевостью.

Выразим $\nabla\Delta N_2^j$ как функцию $\nabla\Delta N_{WL}^j$ ($\nabla\Delta N_{WL}^{jr} = \nabla\Delta N_1^{jr} - \nabla\Delta N_2^{jr} \Rightarrow \nabla\Delta N_2^{jr} = \nabla\Delta N_1^{jr} - \nabla\Delta N_{WL}^{jr}$) и вместо $\nabla\Delta N_{WL}^{jr}$ подставим ранее оцененное на первом этапе РФН значение двойных разностей фазовых неоднозначностей ЛК WL $\nabla\Delta\hat{N}_{WL}^{jr}$. Тогда систему уравнений (4) можно переписать в виде

$$\begin{cases} \hat{\vec{X}}_{SL}(t) = \vec{X}(t) + \delta\vec{X}_{SL}(t) \\ \Delta\hat{L}_{IF}^j(t) = \Delta R^j(t) + \nabla\Delta T^{jr}(t) + \xi_{IF}(t) - \left[\nabla\Delta N_1^{jr} \cdot \lambda_{NL} + k_{IF_2} \cdot \nabla\Delta\hat{N}_{WL}^{jr} \cdot \lambda_2 \right] + \delta\Delta L_{IF}^j(t) \end{cases}, \quad (5)$$

где $\lambda_{NL} = k_{IF_1} \cdot \lambda_1 - k_{IF_2} \cdot \lambda_2 = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 + \lambda_1} = 10.7$ см – длина волны ЛК «Narrow Lane» [1, 5].

Для ввода поправок на тропосферную задержку сигналов в задачах точного позиционирования по сигналам ГНСС широко используется общеизвестная тропосферная модель MOPS [3, 9]. При использовании дифференциального режима координатных определений погрешность данной модели в среднем составляет 5 – 10 % от рассчитанной величины

поправки. При увеличении базового расстояния остаточные погрешности тропосферных задержек возрастают (особенно при существенном перепаде высот между обрабатываемыми

пунктами). Экспериментально установлено, что на базовых удалениях ~1000 км остаточные погрешности тропосферных задержек могут составлять от 10 до 70 см (для наблюдений на малых углах места), что существенно снижает надежность выполнения РФН, а в некоторых случаях вообще не позволяет решить указанную задачу. Поэтому для точного учета тропосферных задержек необходимо оценивать зенитные тропосферные задержки (ЗТЗ) вместе с другими параметрами в предположении, что функции отображения (mapping functions),

позволяющие рассчитать «наклонную» тропосферную задержку, известны с достаточной точностью [10, 11].

Представим тропосферную задержку как сумму тропосферной задержки, рассчитанной по модели MOPS, и поправки, которая получается путем оценивания:

$$\nabla\Delta T^{jr}(t) = \nabla\Delta T_{MOPS}^{jr}(t) + d\nabla\Delta T^{jr}(t), \quad (6)$$

где $\nabla\Delta T_{MOPS}^{jr}(t)$ – двойные разности тропосферных задержек, рассчитанные по модели MOPS [3, 7]; $d\nabla\Delta T^{jr}(t)$ – поправки к двойным разностям тропосферных задержек.

Известно, что задержка сигнала в тропосфере представляется в виде суммы гидростатической и влажностной составляющих [3, 10, 11]:

$$T(\beta) = T_h^z \cdot mf_h(\beta) + T_w^z \cdot mf_w(\beta), \quad (7)$$

где $T(\beta)$ – суммарная тропосферная задержка как функция угла места β ; T_h^z – гидростатическая ("сухая") составляющая ЗТЗ; T_w^z – влажностная составляющая ЗТЗ; $mf_h(\beta)$, $mf_w(\beta)$ – известные функции отображения для гидростатической и влажностной составляющих ЗТЗ соответственно [3, 10, 11].

Поскольку функции отображения гидростатической и влажностной составляющих очень близки [3, 10], отдельная оценка гидростатической и влажной составляющей ЗТЗ является затруднительной. Поэтому предложено выполнять оценку суммарной ЗТЗ. Учитывая сказанное, будем использовать следующую модель для оценки ЗТЗ:

$$d\nabla\Delta T^{jr}(t) = dZ_2(t) \cdot [mf_{w_2}^j(t) - mf_{w_2}^r(t)] - dZ_1(t) \cdot [mf_{w_1}^j(t) - mf_{w_1}^r(t)], \quad (8)$$

где $dZ_2(t)$, $dZ_1(t)$ – поправка к ЗТЗ для «роверного» пункта и РС соответственно; $mf_{w_2}^j(t)$, $mf_{w_1}^j(t)$ – известные функции отображения Niell [10, 11] для влажностных составляющих ЗТЗ «роверного» пункта и РС соответственно для «j-го» спутника; $mf_{w_2}^r(t)$, $mf_{w_1}^r(t)$ – известные функции отображения Niell [10, 11] для влажностных составляющих ЗТЗ «роверного» пункта и РС соответственно для референционного спутника.

Далее выполняется линейризация системы уравнений (5), ее «декорреляция» и совместная оценка вектора поправок к координатам $\Delta\vec{X}$, вектора начальных целочисленных фазовых неоднозначностей для первой частоты $\nabla\Delta N_I^{jr}$, зенитных тропосферных задержек $dZ_2(t)$, $dZ_1(t)$ и $\xi_{IF}(t)$ аналогично методике, детально изложенной в [2]. При этом оценка ЗТЗ выполняется для часовых интервалов. Чтобы избежать проблемы пересечения интервалов оценки ЗТЗ между двух референчных участков, что существенно усложняет обработку, длительность референчных участков выбирается кратной одному часу. Оценка вектора двойных разностей начальных целочисленных фазовых неоднозначностей выполнялась с использованием перебора (fixed-решение) в окрестности float-оценки фазовых неоднозначностей [2].

Для верификации правильности выполнения РФН на референчном участке формируются двойные разности линейной комбинации Ionо Free с вводом поправок на оцененные фазовые неоднозначности. Выполняется проверка, не выходит ли за заданный порог (подбирается

эмпирически) среднее значение рассчитанных двойных разностей. Для тех спутников, по которым превышен порог, принимается решение, что РФН выполнено неверно и соответствующие данные удаляются.

Определение начальных фазовых неоднозначностей на второй частоте L2 осуществляется с использованием фазовых неоднозначностей ЛК Wide Lane [1, 2]:

$$\nabla \Delta \hat{N}_2^{jr} = \nabla \Delta \hat{N}_1^{jr} - \nabla \Delta \hat{N}_{WL}^{jr}. \quad (9)$$

Оценка координат выполняется независимо для каждого референчного участка. После обработки всего интервала наблюдений выполняется оценка средних взвешенных координат:

$$\Delta \hat{X}_\Sigma = \left[\sum_{i=1}^p \hat{K}_{\Delta Xi}^{-1} \right]^{-1} \cdot \sum_{i=1}^p \hat{K}_{\Delta Xi}^{-1} \cdot \Delta \hat{X}_i, \quad (10)$$

где $\Delta \hat{X}_\Sigma$ – взвешенная оценка вектора статических координат; $\hat{K}_{\Delta Xi}$ – оценка корреляционной матрицы оцененных координат для i -го референчного участка; $\left[\sum_{i=1}^p \hat{K}_{\Delta Xi}^{-1} \right]^{-1}$ – корреляционная матрица взвешенной оценки координат (« p » – количество референчных участков); $\Delta \hat{X}_i$ – вектор оценки статических координат для i -го референчного участка.

Верификация предложенных алгоритмов РФН и точного позиционирования с использованием реальных GPS-наблюдений

Для тестирования предложенных алгоритмов был создан экспериментальный модульный программно-алгоритмический комплекс в среде программирования Matlab [12]. Тестирование проводилась с использованием реальных суточных статических двухчастотных GPS-наблюдений перманентных референчных ГНСС станций украинской сети: «GLSV» (Голосеево), «ALCI» (Алчевск) и «KTVL» (Кацевели). На рис. 1 приведена карта расположения указанных станций. Для обработки были использованы GPS-наблюдения на 10 января 2013 г. с темпом 1 Гц. Для верификации алгоритмов РФН на длинных базах были сформированы две базовые линии в направлении «Запад-Восток» – «ALCI»-«GLSV» (базовое расстояние ~645 км) и в направлении «Север-Юг» – «KTVL»-«GLSV» (базовое расстояние ~713 км).

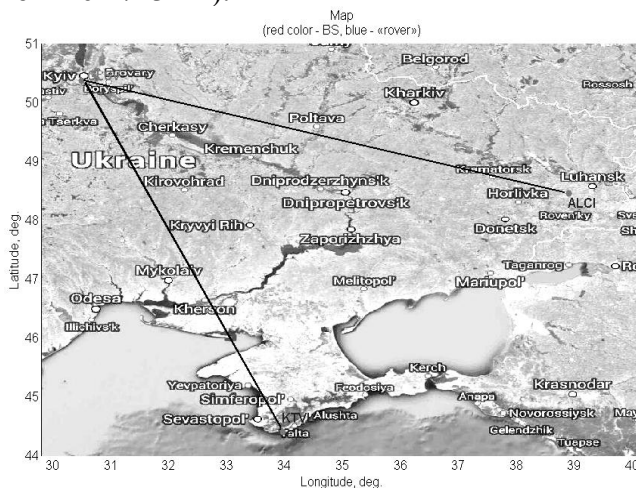


Рис. 1

Сравнение полученных результатов проводилось относительно оценок координат пунктов, полученных при обработке этих же ГНСС-наблюдений с использованием апробированного научного программного комплекса (ПК) «Bernese 5.1» (Швейцария) [4]. Результаты расхождений (разностей) оценок координат ПК «ОСТАВА» и «Bernese 5.1» (в

системе координат ITRF2008 и в локальной топоцентрической системе) приведены в таблице. При обработке использовались точные продукты IGS [13]. На рис. 2 приведены остатки решения. Важно отметить, что в ходе обработки наблюдений были получены надежные целочисленные (fixed) фазовые решения для выбранных подинтервалов внутри суток (референчных участков) длительностью от 1 часа до 4 часов.

| | «ALCI»-«GLSV» (645 км) | «KTVL»-«GLSV» (713 км) |
|----------------|---------------------------|---------------------------|
| ΔX , м | 0.0001 | 0.0034 |
| ΔY , м | 0.0027 | 0.0028 |
| ΔZ , м | -0.0061 | -0.0048 |
| ΔB , м | -0.0036 | -0.0058 |
| ΔL , м | 0.0020 | 0.0004 |
| ΔH , м | -0.0014 | 0.0006 |

В таблице присутствуют следующие условные обозначения: ΔB – линейный эквивалент погрешности по направлению «Север-Юг»; ΔL – линейный эквивалент погрешности по направлению «Запад – Восток».

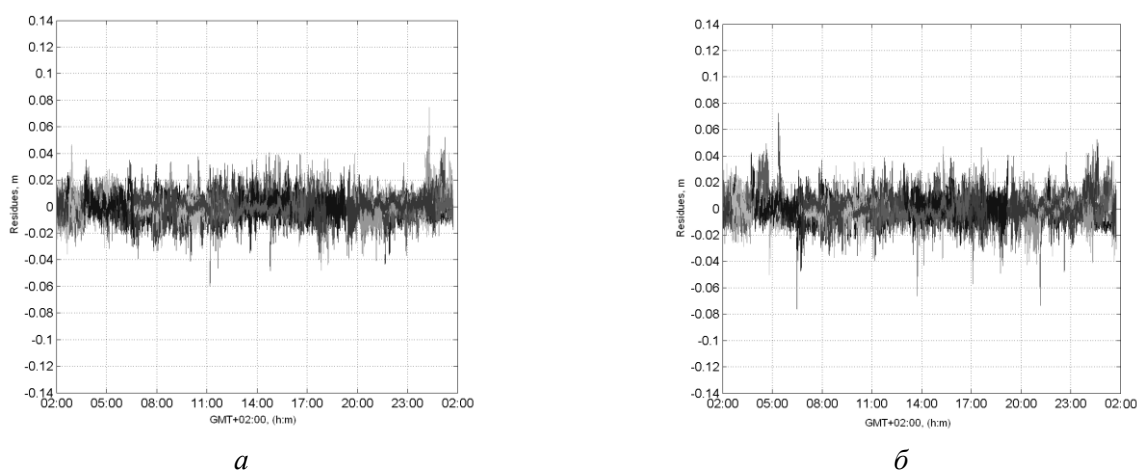


Рис. 2. Остатки решения: *a* – «ALCI»-«GLSV», *б* – «KTVL»-«GLSV»

Как известно [1, 4], апробированный мировым научным сообществом ПК «Bernese» обеспечивает для рассмотренных условий измерений миллиметровую точность позиционирования и поэтому используется, в частности, в IGS/EPN центрах обработки ГНСС наблюдений. Как следует из приведенных результатов, полученные оценки координат совпадают с оценками ПК «Bernese 5.1» с расхождениями в несколько миллиметров. Из этого можно сделать вывод, что предложенные алгоритмы позволяют выполнять координатные определения также на миллиметровом уровне точности.

Выводы

Представлены результаты разработки и тестирования модифицированных алгоритмов решения задачи РФН и точного позиционирования на длинных базовых расстояниях. В результате проведенных исследований показано, что разработанные алгоритмы позволяют получать надежное fixed-решение задачи разрешения фазовой неоднозначности (на интервалах длительностью не менее одного часа) и выполнять координатные определения с миллиметровым уровнем точности.

В дальнейших исследованиях для улучшения результатов позиционирования предполагается модифицировать алгоритмы обработки ГНСС наблюдений для кинематического режима позиционирования. Разработанные алгоритмы также предполагается использовать при создании технологии точного позиционирования PPP (Precise Point Positioning [6]).

Работа выполнена в рамках финансирования Целевой комплексной программы НАН Украины по космическим исследованиям на 2012 – 2016 гг. в целях реализации международного проекта «Ионосат-Микро» [14].

Автор выражает благодарность научному руководителю, кандидату технических наук А.А. Жалило, за полезные замечания, рекомендации и помощь, оказанную при работе над материалами статьи.

Список литературы: 1. *Гофманн-Веллінгоф Б.* Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія та практика: пер. з англ. / Б. Гофманн-Веллінгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз ; пер. з англ за ред. Я. С. Яцківа. – Київ : Наук. думка, 1996. – 380 с. 2. *Жалило А.А., Дицкий И.В.* Усовершенствованный метод разрешения фазовой неоднозначности двухчастотных дифференциальных фазовых ГНСС-наблюдений // Радиотехника. – 2012. – №169. – С. 277-301. 3. *Schüler T.* On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation / Dissertation, Schriftenreihe 73, Studiengang Geodäsie und Geoinformation, Universität der Bundeswehr München, February 2001. 4. *Bernese GPS Software Version 5.0 [Электронный ресурс] / Astronomical Institute, University of Bern.* – Режим доступа: www.bernese.unibe.ch/docs50/DOCU50.pdf. 5. *Желанов А.А.* Развитие методов и алгоритмов обработки фазовых наблюдений Глобальных навигационных спутниковых систем в задачах высокоточного кинематического позиционирования : дис. ... канд. техн. наук / А.А. Желанов. – Х., 2010. – 155 с. 6. *Яковченко А.И.* Основные источники и составляющие погрешностей ГНСС-наблюдений и их моделирование при реализации метода точного позиционирования PPP // Радиотехника. – 2012. – №169. – С. 315-330. 7. *Zhalilo A., Shelkovenkov D.* 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. 8. *Кондратюк В. М., Желанов А. А.* Высокоточное позиционирование движущихся объектов с использованием усовершенствованного метода сглаживания кодовых дифференциальных ГНСС-наблюдений / Кондратюк В. М., Желанов А. А. // 4-й Прикладная радиоэлектроника. Состояния и перспективы развития. – 2011. – Т. 1, ч. 2. – С. 79 – 82. 9. *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. 10. *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. – P. 3227 – 3246. 11. *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. 12. *Поршнев С.В.* MATLAB 7. Основы работы и программирования : учебник. – Изд-во "Бином. Лаборатория знаний", 2006. – 320 с. 13. *J.M. Dow, R.E. Neilan, C. Rizos* The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite System, Journal of Geodesy, 2009. 14. *Космический проект «Ионосат-Микро» : монография ; под общ. ред. С.А. Засухи, О.П. Федорова.* – Киев : Академперіодика, 2013. — 218с.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 11.11.2014