

## МЕТОД СЕТЕВОЙ ОБРАБОТКИ ФАЗОВЫХ ОДНОЧАСТОТНЫХ GNSS-ИЗМЕРЕНИЙ С УЧЕТОМ ИХ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДЕКОРРЕЛЯЦИИ

Лукьянов А.М., Гринченко Е.В., Галевич М.Н., Лукьянова О.А.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
61166, Харьков, пр. Ленина, НИЦ ИИРЭСТ, тел. (057) 702-15-32,

E-mail: [grinchenko@kture.kharkov.ua](mailto:grinchenko@kture.kharkov.ua)

The method of phase GNSS-measurements ambiguity resolution, which is based on the float-processing of data of base stations network, is considered. The method of forming of the weighting matrix of observations, which takes into consideration the peculiarities of space correlation of different components of GNSS-measurements, is developed. The results of modeling with use of real data, which verify the efficiency of the suggested algorithms work, are presented.

**Введение.** Определение координат с точностью до нескольких сантиметров или даже миллиметров необходимо для реализации ряда очень важных приложений (в частности, для геодезии, картографии и кадастра). Такой точности позиционирования можно достичь, используя измерения фазы несущей частоты сигналов навигационных спутников.

Основной трудностью при обработке фазовых измерений является то, что они неоднозначны: фаза определяется с точностью до неизвестного целого числа полных циклов. Поэтому раскрытие фазовых неоднозначностей представляет собой важнейшую задачу, решение которой необходимо для получения высокоточных координат. Сложность решения этой задачи возрастает вместе с расстоянием между потребителем и базовой станцией, что связано с уменьшением корреляции погрешностей измерений двух приемников. В случае, когда это расстояние достигает нескольких десятков километров, повысить точность определяемых параметров позволяет тщательное взвешивание неравноточных обрабатываемых данных, а также совместная обработка измерений сети базовых станций.

Исследуемый подход к раскрытию фазовых неоднозначностей базируется на использовании одинарных разностей измерений и float-метода обработки. На его примере проверяется эффективность разработанного алгоритма сетевой обработки фазовых измерений, в котором весовая матрица наблюдений формируется с учетом особенностей пространственной декорреляции различных компонент погрешностей измерений.

**Характерные особенности выбранного подхода к раскрытию фазовых неоднозначностей.** Уравнения одинарных разностей фазовых наблюдений, представляющие собой основу для решения навигационной задачи, после осуществления их линеаризации, могут быть записаны следующим образом:

$$h_i^T(t_k) \cdot \Delta x + \Delta(t_k) + \alpha_i + \Delta \delta_{mi}(t_k) = \Delta \Delta S_{mi}(t_k), \quad m = 1, \dots, M, \quad i = 1, \dots, I, \quad k = 1, \dots, K, \quad (1)$$

где  $t_k$  – очередная эпоха измерений,

$m$  – номер базовой станции сети,

$i$  – номер спутника,

$\Delta x$  – вектор-поправка к приблизительным координатам приемника потребителя,

$\Delta(t_k) = c \cdot (\Delta T(t_k) - \Delta T(t_1)), \quad \Delta(t_1) = 0,$

$c$  – скорость света,

$\Delta T(t_k)$  – разность уходов шкалы времени потребителя и сетевой шкалы времени,

$\alpha_i = c \cdot \Delta T(t_1) + \lambda \cdot \Delta N_i,$

$\lambda$  – длина волны, соответствующая частоте измерений,

$\Delta N_i$  – разность фазовых неоднозначностей для  $i$ -го спутника, соответствующих приемнику потребителя и сети – целое число (предполагается, что в измерениях базовых станций сети фазовые неоднозначности раскрыты),

$\Delta \delta_{mi}(t_k)$  – разность суммарных погрешностей измерений приемников потребителя и  $m$ -й базовой станции, соответствующих  $i$ -му спутнику,

$$\Delta \Delta S_{mi}(t_k) = \Delta S_{mi}(t_k) - \left( R_{rov,i}^*(t_k) - R_{mi}(t_k) \right),$$

$\Delta S_{mi}(t_k) = S_{rov,i}(t_k) - S_{mi}(t_k)$  – разность фазовых псевдодальностей, измеренных для  $i$ -го спутника приемником потребителя и  $m$ -й базовой станцией,

$R_{mi}(t_k)$  – расстояние между  $i$ -м спутником и  $m$ -й базовой станцией,

$R_{rov,i}(t_k)$ ,  $R_{rov,i}^*(t_k)$  – расстояние между  $i$ -м спутником и приемником потребителя и его оценка, вычисленная с помощью приближенных значений координат потребителя,

$h_i(t_k)$  – вектор частных производных параметра  $R_{rov,i}(t_k)$  по координатам потребителя,

$\Delta x$  – вектор-поправка к приближенным координатам потребителя.

В этой системе уравнений неизвестными величинами являются параметры  $\Delta x$ ,  $\Delta(t_k)$  и  $\alpha_i$ , и ее решение, в соответствии с float-методом обработки, описанным в [1], может быть найдено с помощью метода наименьших квадратов (МНК). Как показано в [1], данный float-алгоритм обработки одиарных разностей измерений фазы эквивалентен по точности алгоритмам раскрытия фазовых неоднозначностей, использующим тройные разности, и в то же время он значительно превосходит их по простоте.

В состав полученного в результате float-решения входит оценка главного искомого параметра – поправки к координатам потребителя  $\Delta x$ . Однако многочисленность других неизвестных ( $\alpha_i$  и  $\Delta(t_k)$ ), оцениваемых одновременно с этой величиной, неизбежно приводит к существенному снижению точности ее определения. Для повышения точности позиционирования необходимо до конца раскрыть фазовые неоднозначности, то есть вычислить целочисленные значения параметров  $\Delta N_i$ . Это можно сделать путем округления

величин  $\alpha_i / \lambda$  в предположении, что  $\left| \frac{c}{\lambda} \cdot \Delta T(t_1) \right| < 1$ . При этом округление может быть выполнено только для тех параметров  $\alpha_i$ , СКО которых,  $\sigma(\alpha_i)$ , удовлетворяет условию:  $3 \cdot \sigma(\alpha_i) < \lambda / 2$ .

Раскрытые фазовые неоднозначности исключаются из числа неизвестных системы (1) и вводятся в ее уравнения в качестве поправок. Решение модифицированной таким образом системы (fixed-решение) обладает существенно более высокой точностью, чем полученное ранее float-решение, что обусловлено уменьшением количества неизвестных параметров, подлежащих определению.

Совместное оценивание всех неизвестных параметров как действительных чисел и последующее округление значений  $\Delta N_i$  является принципиальным отличием данного подхода от других алгоритмов раскрытия фазовых неоднозначностей, при реализации которых поиск значений  $\Delta N_i$  изначально осуществляется среди множества целых чисел методами перебора, что зачастую является более длительным процессом.

**Формирование весовой матрицы измерений.** Величина дисперсии параметров, определяемых при раскрытии фазовых неоднозначностей и решении навигационной задачи, позволяет не только оценить точность позиционирования, но и решить, как было сказано выше, вопрос о возможности раскрытия той или иной неоднозначности. Поэтому необходимо, чтобы оценка ковариационной матрицы решения системы (1) была как можно более точной, а важнейшим способом повышения ее точности является выбор весовой матрицы измерений.

Сформируем ковариационную матрицу погрешностей измерений  $K(\Delta \delta)$ , которая является обратной для весовой матрицы. В предположении, что погрешности измерений, соответствующие разным спутникам и разным эпохам, не коррелируют между собой, будем искать матрицу  $K(\Delta \delta)$  диагональной. Параметры  $\Delta \delta_{mi}(t_k)$ , дисперсии которых расположены на ее диагонали, в случае обработки одночастотных измерений имеют вид:

$$\Delta \delta_{mi}(t_k) = \Delta \delta_{Ion_{mi}}(t_k) + \Delta \delta_{Trop_{mi}}(t_k) + \Delta \delta_{Eph_{mi}}(t_k) + \Delta \delta_{\epsilon_{mi}}(t_k), \quad (2)$$

где каждое слагаемое представляет собой разность погрешностей измерений потребителя и  $m$ -й базовой станции, обусловленных определенным фактором: первое слагаемое – влиянием ионосферы, второе – влиянием тропосферы, третье – неточностью координат спутника (эфемерид), четвертое – влиянием эффекта многолучевости и шумами.

Все компоненты суммарной погрешности измерений, представленные в (2), имеют различное происхождение и поэтому попарно не коррелированы. Следовательно, дисперсия параметра  $\Delta \delta_{mi}(t_k)$  имеет вид суммы дисперсий слагаемых, стоящих в правой части (2). Оценим дисперсию каждого из этих слагаемых.

На основании широко используемой для ионосферы модели тонкого слоя ([2]) может быть получена следующая оценка СКО разности ионосферных погрешностей измерений двух приемников:

$$\sigma(\Delta \delta_{Ion_{mi}}(t_k)) = \frac{1}{\sin El_i^*(t_k)} \cdot \frac{40,3}{f^2} \cdot \rho_{mi}^*(t_k) \cdot \sigma\left(\frac{\partial \Delta VTEC}{\partial \rho_{mi}^*(t_k)}\right), \quad (3)$$

где  $f$  – частота, на которой проводятся измерения,

$El_i^*(t_k)$  – угол возвышения спутника в точке пересечения радиолучом тонкой ионосферы (так называемой “точке прокола” ионосферы),

$\rho_{mi}^*(t_k)$  – расстояние между “точками прокола” ионосферы, соответствующими приемнику потребителя и  $m$ -й базовой станцией,

$\Delta VTEC$  – разность зенитных электронных концентраций в “точках прокола”, соответствующих приемнику потребителя и  $m$ -й базовой станцией.

Согласно экспериментальным оценкам последнего параметра ([3]), его величина составляет:

в ночное время – от 0,018 ТЕС/км до 0,036 ТЕС/км;

в дневное время – от 0,072 ТЕС/км до 0,108 ТЕС/км;

в период геомагнитных штормов – от 0,45 ТЕС/км до 0,9 ТЕС/км.

Аналогичное выражение верно и для СКО разности тропосферных погрешностей:

$$\sigma(\Delta \delta_{Trop_{mi}}(t_k)) = \frac{1}{\sin El_i(t_k)} \cdot \rho_m \cdot \sigma\left(\frac{\partial \Delta \delta_{Trop_{z,mi}}(t_k)}{\partial \rho_m}\right), \quad (4)$$

где  $\rho_m$  – расстояние между приемником потребителя и  $m$ -й базовой станцией,

$\Delta \delta_{Trop_{z,mi}}(t_k)$  – разность зенитных тропосферных задержек в точках расположения потребителя и  $m$ -й базовой станции,

$El_i(t_k)$  – угол возвышения спутника.

Как показывает серия экспериментов, проведенных с использованием реальных измерений метеорологических параметров ([4]), величина последнего множителя в (4) может быть положена равной 0,002 м/км.

Погрешность измерений, обусловленная неточностью эфемерид, в предположении, что ошибки координат спутника не коррелированы, а СКО каждой из них составляет 5м, представима в виде:

$$\sigma^2(\Delta \delta_{Eph_{mi}}(t_k)) = 25 \cdot \dot{h}_{mi}^T(t_k) \cdot \dot{h}_{mi}(t_k), \quad (5)$$

где  $\dot{h}_{mi}(t_k)$ , – вектор частных производных параметра  $(R_{mi}(t_k) - R_{rov,i}^*(t_k))$  по координатам  $i$ -го спутника.

И, наконец, оценивая величину дисперсии последней компоненты выражения (2) – составляющей погрешности измерений, обусловленной эффектом многолучевости и шумами, учтем ее зависимость от угла возвышения спутника:

$$\sigma^2(\Delta \delta_{\varepsilon_{mi}}(t_k)) = (0,03 / \sin El_{mi}(t_k))^2. \quad (6)$$

**Результаты моделирования.** Моделирование представленного алгоритма осуществлялось с использованием измерительной информации, записанной 11 декабря 2008 г.

Сеть создавали четыре приемника, расположенные в городах Киев, Чернигов, Смела и Прилуки, расстояния между ними составляли около 130-160 км. Кроме того, были использованы измерения пяти роверных приемников, расположенных в зоне действия этой сети. Наблюдения регистрировались ежесекундно, продолжительность сеансов измерений роверов составляла от 1 часа 7 минут до 3 часов 10 минут. Предварительная обработка измерительной информации проводилась с помощью программно-алгоритмического комплекса «ОСТАВА» ([5]), она включала в себя отбраковку измерений, содержащих повышенные погрешности, а также починку фазовых скачков. В качестве эталонных координат приемников были приняты их оценки, полученные с помощью программного обеспечения GrafNav/GrafNet, разработанного фирмой NovAtel Inc. (Канада).

Результаты экспериментального определения координат роверов по фазовым измерениям на частоте L1 с использованием измерений этой сети базовых станций приведены в следующей таблице, где содержатся средние по сеансу измерений значения отклонений вычисленных координат от эталонных значений, их среднеквадратичные отклонения (СКО) и величины, которые являются верхними границами для 95% значений отклонений координат.

<b>Fixed- решение</b>	<b>dE</b>	<b>dN</b>	<b>dH</b>
<b>Среднее отклонение</b>	0.0078 – 0.0356	0.0054 – 0.0134	0.0074 – 0.0216
<b>СКО</b>	0.0093 – 0.0231	0.0289 – 0.0352	0.0421 – 0.0522
<b>Предельная погрешность (95%)</b>	0.0190 – 0.0806	0.0679 – 0.0833	0.1001 – 0.1187

Относительное отклонение полученных в ходе эксперимента оценок координат от эталона не превышает предельно возможных значений, рассчитанных по вычисленным СКО этих оценок, что свидетельствует о корректности полученных результатов. Эти результаты позволяют считать доказанной возможность достижения субдециметрового уровня точности одночастотных координатных определений с использованием взвешенных фазовых наблюдений сетей базовых станций с базовыми расстояниями до 160 км.

#### **Литература:**

1. Жалило А.А., Яковченко А.И., Способ реализации относительных геодезических определений по сигналам GPS/ГЛОНАСС с использованием float-обработки фазовых наблюдений. // Радиоэлектроника. Известия ВУЗов. Т.42, № 12, 1999 г., стр. 55-61
2. Гофман-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Г., Коллінз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика. – Київ: Наукова Думка, 1996, 380 с.
3. Vo H. B. and Foster J. C., Atmospheric Sciences Group, MIT Haystack Observatory. A Quantitative Study of Ionospheric Density Gradients at Mid-Latitudes, <http://www.haystack.mit.edu/~jcf/papers/finalgradients.pdf>
4. Лукьянов А.М. Коррекция тропосферных задержек сигналов спутниковых навигационных систем в СКНОУ. // Сборник научных трудов 2-го Международного радиоэлектронного форума “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития.” (МРФ’2005), т. 2 – Международная конференция “Системы локации и навигации” (МКЛСН’2005), 19-23 сентября 2005 г., Харьков – стр. 536-539
5. Жалило А.А., Шелковенков Д.А. ОСТАВА: Многофункциональный программный инструментарий обработки и анализа GPS/GNSS наблюдений. // Сборник материалов XIV Международной конференции по интегрированным навигационным системам, 28-30 мая 2007 г., Санкт-Петербург – стр. 319-321