

## ВЫСОКОТОЧНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО МЕТОДА СГЛАЖИВАНИЯ КОДОВЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ГНСС-НАБЛЮДЕНИЙ

Кондратюк В.М.<sup>1</sup>, Желанов А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный авиационный университет  
03058, Киев, пр. Космонавта Комарова 1,

E-mail: [kon\\_vm@ukr.net](mailto:kon_vm@ukr.net)

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
61166, Харьков, пр. Ленина, каф. Основ радиотехники,

E-mail: [datum@ukr.net](mailto:datum@ukr.net)

Results of development and verification of New Code Smoothing Algorithm in Kinematic mode which take into account influence «Wind-Up» - effect. In a Kinematic Differential mode Accuracy of Positioning 10 cm (95 %) on plane coordinates and 30-40 cm (95 %) on a vertical are derived.

Для точного определения местоположения (позиционирования) движущихся объектов по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в дифференциальном режиме для достижения дециметровой точности в большинстве случаев применяется фильтрация/сглаживание кодовых наблюдений с использованием фазовых наблюдений, что обусловлено относительной простотой и надежностью такого подхода [1-3]. Сглаживание позволяет эффективно уменьшить наиболее значимые погрешности дифференциальных кодовых наблюдений – погрешности, обусловленные многолучевостью и шумами [1]. Наибольшая эффективность сглаживания достигается при отсутствии фазовых циклических скачков на интервале наблюдений и увеличении этого интервала до 15 мин и более. В общем случае, задача заключается в получении оптимальной оценки уровня неоднозначных высокоточных фазовых наблюдений относительно однозначных, но зашумленных и отягощенных многолучевостью кодовых наблюдений, после чего выполняется «замена» кодовых наблюдений фазовыми путем коррекции уровня фазовых наблюдений. Детально один из вариантов реализации эффективных алгоритмов сглаживания описан в работе [1]. Но, как показали дальнейшие исследования, когда осуществляется позиционирование движущихся объектов (кинематический режим наблюдений), алгоритм обработки наблюдений [1] не учитывает т.н. «wind-up»-эффекта [4] (данный эффект свойственен только фазовым измерениям при эволюциях объекта - повороты, вращения приемной антенны), а также влияние вариационной составляющей ионосферных задержек. Это может приводить к значительным дополнительным погрешностям позиционирования, которые во многих случаях могут достигать нескольких дециметров.

В настоящей работе приведены результаты разработки и верификации нового усовершенствованного алгоритма сглаживания кодовых наблюдений с использованием непрерывных фазовых GPS-наблюдений в режиме кинематической съемки, который, в отличие от алгоритмов, предложенных в работах [1-3], исключает влияние «wind-up»-эффекта [5], использует представление уравнений наблюдений в виде т.н. «виртуальных двойных разностей» и, за счет этого, позволяет повысить точность местоопределения подвижных объектов по сравнению с аналогами. Как показало предварительное тестирование, предложенный алгоритм реализации дифференциального метода местоопределения по наблюдениям одной частоты (L1) сравним и близок по точности местоопределения с алгоритмами, которые реализуют фазовый двухчастотный метод с использованием наблюдений Wide-Lane разностной частоты [5].

**Новый подход к сглаживанию кодовых наблюдений с использованием фазовых наблюдений.** Разработанный подход предполагает, что в используемых наблюдениях исключены аномалии, фазовые циклические скачки (т.н. «слипы») и восстановлена непрерывность фазовых наблюдений. Ниже приведена исходная система уравнений наблюдений, которая использовалась при разработке алгоритмов обработки.

Исходная система уравнений

$$\begin{cases} \Delta \hat{S}^j(t_k) = \Delta R^j(t_k) + \frac{\Delta(t_k)}{\eta_S} \Delta b_S + \Delta \text{Tr}^j(t_k) + \Delta I^j(t_k) + \delta \Delta S^j(t_k) \\ \Delta \hat{L}^j(t_k) = \Delta R^j(t_k) + \frac{\Delta(t_k)}{\eta_L} \Delta b_L + \Delta \text{Tr}^j(t_k) - \Delta I^j(t_k) - \Delta N^j \cdot \lambda_1 + w(t_k) + \delta \Delta L^j(t_k) \end{cases}, (1)$$

где  $\Delta \hat{S}^j(t_k)$ ,  $\Delta \hat{L}^j(t_k)$  – одинарные разности кодовых и фазовых наблюдений;

$\Delta R^j(t_k) = \hat{R}_{\text{Ровер}}^j(t_k) - \hat{R}_{\text{БС}}^j(t_k)$  – одинарная разность дальностей (БС-базовая станция или опорный приемник);

$\eta_S, \eta_L$  – переменные, включающие в себя расхождения шкал времени между приемными пунктами и разности задержек в трактах приемников;

$\Delta \text{Tr}^j(t_k)$  – разность тропосферных задержек;

$\Delta I^j(t_k)$  – разность ионосферных задержек;

$\Delta N^j$  – одинарная разность фазовых неоднозначностей;

$w(t_k)$  – «wind-up» эффект;

$\delta \Delta S^j(t_k)$ ,  $\delta \Delta L^j(t_k)$  – многолучевая и шумовая составляющие погрешности.

В процессе обработки в наблюдениях учитываются  $\hat{R}_{\text{БС}}^j(t_k)$  и вводятся коррекции на задержки в слоях атмосферы. После чего, система уравнений линейризуется и примет следующий вид:

$$\begin{cases} \Delta \overset{*}{S}^m(t_k) = \left\| a_X^m(t_k) \right\| \cdot \overset{\rightarrow}{\Delta X}(t_k) + \mu_S(t_k) + \nabla \Delta I_{\phi l}^{m1}(t_k) + \delta \nabla \Delta \text{Tr}^{m1}(t_k) + \nabla \Delta S_{ml}^{m1}(t_k) + \delta \Delta S^m(t_k) \\ \Delta \overset{*}{L}^m(t_k) = \left\| a_X^m(t_k) \right\| \cdot \overset{\rightarrow}{\Delta X}(t_k) + \mu_L(t_k) - \nabla \Delta N^{m1} \cdot \lambda_1 - \nabla \Delta I_{\phi l}^{m1}(t_k) + \delta \nabla \Delta \text{Tr}^{m1}(t_k) + \delta \Delta L^m(t_k) \end{cases}. (2)$$

Дальнейшая обработка наблюдений (2) проводится следующим образом:

- 1) Формируются двойные разности кодовых и фазовых наблюдений относительно референцного спутника;
- 2) Формируются разности «код-фаза» двойных разностей наблюдений;
- 3) Оцениваются средние значения полученных разностей;
- 4) Выполняется операция сглаживания кодовых наблюдений. Система уравнений примет следующий вид:

$$\Delta \tilde{S}^m(t_k) = \left\| a_X^m(t_k) \right\| \cdot \overset{\rightarrow}{\Delta X}(t_k) + \tilde{\eta}_{SL}(t_k) + \delta \tilde{f}^m(t_k) + \delta \Delta L^m(t_k), (3)$$

где  $\tilde{\eta}_{SL}(t_k) = \Delta(t_k) + \Delta b_S + w(t_k) - \langle w(t_k) \rangle$  – оцениваемый параметр;

$\delta \tilde{f}_{(j=1,m)}^j(t_k) = 2 \cdot \langle \Delta I_{\phi l}^j(t_k) \rangle - \Delta I_{\phi l}^j(t_k) + \langle \Delta S_{ml}^j(t_k) \rangle$  – медленноменяющиеся составляющие погрешности.

- 5) Выполняется оценка параметров  $\overset{\rightarrow}{\Delta X}(t_k)$  и  $\tilde{\eta}_{SL}(t_k)$  по методу наименьших квадратов.

**Результаты верификации предложенного подхода с использованием реальной измерительной информации.** Исходные данные для верификации предложенного алгоритма послужили измерения базовой станции GLSV (Киев, Голосеево) и движущего приемника, расположенного в Черкасской области на удалении ~ 100 км от базовой станции. Измерения были проведены в рамках совместных экспериментов Главной астрономической обсерватории НАН Украины, Национального авиационного университета, Харьковского национального университета радиоэлектроники и ГП «Оризон-Навигация». Длительность интервала наблюдений составила ~ 55 мин с темпом данных 1 Гц.

При проведении тестирования и исследований разработанных процедур обработки измерений выполнялись следующие действия.

1) Используемые наблюдения подвергались предварительной обработке с использованием программного обеспечения «ОСТАВА» [2, 3], которое позволило оценить качество используемых кодовых и фазовых наблюдений, устранить циклические фазовые скачки, восстановить непрерывность фазовых наблюдений и т.д.

2) Выполнена обработка наблюдений и были получены высокоточные (с сантиметровой точностью) эталонные оценки координат кинематических объектов, станции и роверного пункта с использованием лицензионного ПО «GrafNav/GrafNet» (NovAtel Inc./Waypoint, Канада).

3) В ходе тестирования выполнялось сглаживание кодовых наблюдений с использованием фазовых согласно предложенному подходу.

4) После фильтрации наблюдений выполнялось решение навигационной задачи с использованием сглаженных кодовых наблюдений. Для компенсации ионосферной составляющей погрешностей использовались модель GIM IONEX. Для компенсации тропосферной составляющей погрешностей использовалась модель MOPS.

На рис. 1-2 отображены невязки координатных решений, полученных при обработке кодовых, «сглаженных» по предложенному подходу кодовым наблюдениям, а также при обработке однозначных фазовых наблюдений разностной частоты. На рис. 3 приведены остатки между реальными наблюдениями и предложенной моделью.

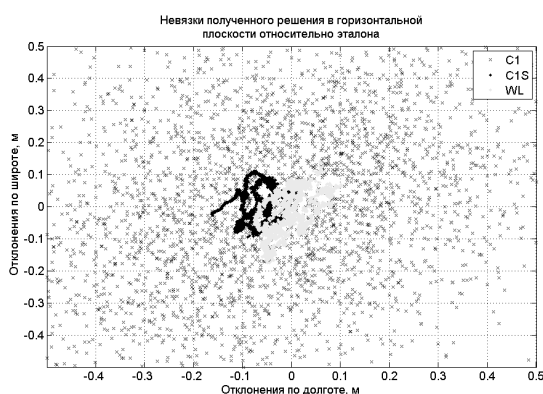


Рис. 1

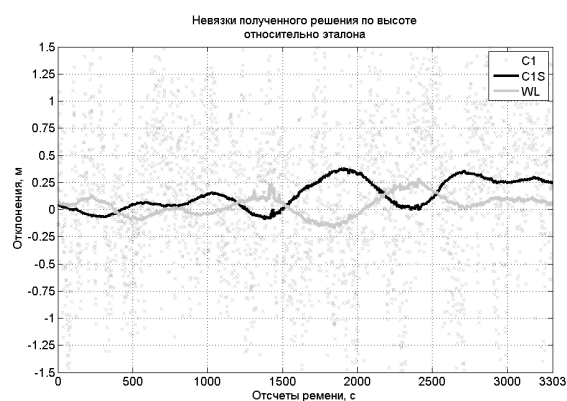


Рис. 2

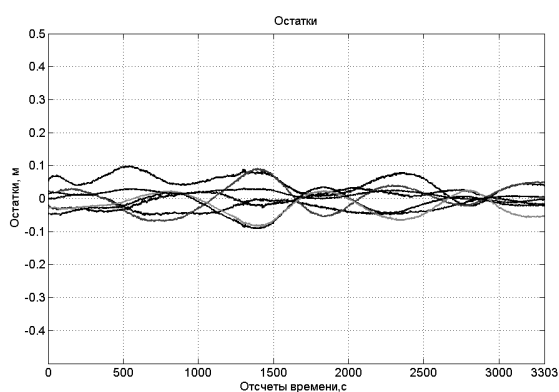


Рис. 3

## Выводы.

1. В докладе приведены результаты разработки и верификации нового алгоритма сглаживания кодовых наблюдений с использованием непрерывных фазовых наблюдений в режиме кинематической съемки, который, в отличие от аналогов, учитывает влияние

«wind-up»-эффекта, обусловленного эволюциями приемной ГНСС-антенны, и за счет этого позволяет повысить точность местоопределения подвижных объектов.

2. Разработанный алгоритм верифицирован с использованием реальной измерительной информации (кодowo-фазовых наблюдений одной частоты L1, в данном случае - GPS) и может быть использован как для статического, так и для кинематического точного позиционирования. Результаты исследований показали, что достижимый уровень точности позиционирования в кинематическом дифференциальном режиме составляет 10 см (95%) по плановым координатам и 30-40 см (95%) по вертикали, что сравнимо по точности местоопределения с возможностями фазового двухчастотного метода с использованием наблюдений Wide-Lane разностной частоты..

3. Дальнейшие исследования по данному направлению предполагают разработку адекватной модели погрешностей и верификацию подхода к оценке точности получаемого «сглаженного» решения в условиях сильной коррелированности во времени многолучевой составляющей погрешности кодовых псевдодальностей и вариаций ионосферной задержки. Кроме того, в ходе дальнейших исследований планируется выполнить модификацию разработанных алгоритмов обработки в случае использования многосистемных наблюдений, например, совместных ГНСС-наблюдений GPS+ГЛОНАСС.

#### **Литература:**

1. Жалило А.А. Сглаживание двухчастотных кодовых GPS-наблюдений с использованием фазовых в режиме послесанной обработки / А.А. Жалило, В.М. Шокало, Н.В. Саданова, Д.А. Шелковенков // Труды 2-го Международного радиоэлектронного форума (МРФ-2005) "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития"., Международная конференция по системам локации и навигации (МКЛСН-2005), г. Харьков, ХНУРЭ, 19-23 сентября, 2005 г., Т.2, С. 548-551.

2. Жалило А.А. "ОCTAVA": многофункциональный программный инструментарий обработки и анализа GPS/GNSS наблюдений /А.А. Жалило, Д.А. Шелковенков// Интегрированные навигационные системы: XIV междунар. конф., май 2007., Россия: труды. – С.-Пб.2007.:– С. 319-321.

3. Шелковенков Д.А. Контроль качества кодовых и фазовых GPS-наблюдений на этапе предварительной обработки / Д.А. Шелковенков// Интегрированные навигационные системы: XIV междунар. конф., май 2007., Россия: труды. – С.-Пб.2007.:– С. 310-312.

4. Wu J.T. Effects on antenna orientation on GPS carrier phase // J.T. Wu, S.C. Wu, G.A. Hajj, W.I. Bertiger, S.M. Lichten // Режим доступа:  
<http://adsabs.harvard.edu/abs/1992asdy.conf.1647W>

5. Желанов О.О. Розвиток методу та алгоритмів обробки фазових спостережень глобальних навігаційних супутникових систем в задачах високоточного кінематичного позиціонування: дис. канд.техн. наук.: 05.12.17 / Желанов Олександрович; ХНУРЕ. – Х., 2011. – 157 с.