

## МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДЕРЖЕК В АНАЛОГОВЫХ ТРАКТАХ ДВУХЧАСТОТНЫХ ПРИЕМНИКОВ СИСТЕМЫ GPS

В.Н. Дейнеко

(представил д.т.н., проф. В.П. Деденок)

*Представлен метод оценивания систематической погрешности двухчастотных измерений по сигналам спутниковой системы GPS, которая связана с разностью задержек сигналов в аналоговых трактах приемника в диапазонах частот GPS: L1 (1575,42 МГц) и L2 (1227,6 МГц).*

**Введение.** Для точного определения координат с использованием сигналов спутниковой навигационной системы GPS необходимо учитывать влияние различных источников погрешностей, таких как задержка распространения сигнала в атмосфере (тропосфере и ионосфере), частотно-временные рассинхронизации, неточность знания координат спутников, релятивистские эффекты и др. Практика использования GPS и **анализ литературы** [1 – 3] показывает, что после отмены в 2000 году режима селективного доступа системы наиболее значимую погрешность в измерения вносит ионосфера. При этом значения ионосферной задержки сигналов от спутников могут достигать значений до 50 метров. В связи с этим в последние годы значительно вырос интерес как к исследованию влияния ионосферы на GPS измерения с целью формирования коррекций, так и к исследованию самой ионосферы с помощью GPS-измерений.

Определение ионосферных параметров в сетях GPS-станций осуществляется на основании двухчастотного метода измерений. Точность данного метода ограничивается шумами приемной аппаратуры (инструментальной погрешностью измерения дальности) и систематической погрешностью, вызванной различным временем прохождения сигналов в каналах L1 и L2 спутников и приемника. Для эффективного и достоверного измерения параметров ионосферы с помощью средств и аппаратуры GPS необходимо выполнение периодической калибровки аналоговых трактов приемных устройств наземных пунктов и передающих устройств спутников. Данная задача для приемных устройств является технологически трудоемкой, а для передающих устройств спутников – невыполнимой на этапе их штатной эксплуатации. Таким образом, **постановка проблемы** заключается в разработке метода

оценивания указанных мешающих параметров средствами измерительных пунктов.

Величины систематических задержек лежат в пределах  $\pm (1,5 \dots 9)$  м для наземной приемной аппаратуры и  $\pm (0,45 \dots 1,5)$  м – для передающей аппаратуры спутников, что является достаточно значимым при измерении ионосферных параметров двухчастотным методом. Уравнение двухчастотных комбинаций GPS-измерений в присутствии указанных погрешностей представляется в следующем виде:

$$\Delta \widehat{I} = \frac{\widehat{S}_{L1} - \widehat{S}_{L2}}{1 - f_1^2 / f_2^2} + \Delta_c + \Delta_{пр} + \delta, \quad (1)$$

где  $\Delta \widehat{I}$  – оценка ионосферной задержки;  $\widehat{S}_{L1}, \widehat{S}_{L2}$  – оценки псевдодальностей в каналах L1 и L2;  $f_1, f_2$  – частоты сигналов;  $\Delta_c$  и  $\Delta_{пр}$  – погрешности, обусловленные различным временем прохождения сигнала в каналах L1 и L2 передатчика и приемника соответственно;  $\delta$  – шумы приемника.

Влияние указанных задержек, получивших в современной научнотехнической литературе термин “interfrequency biases” или IFB, наглядно проиллюстрировано на рис. 1.

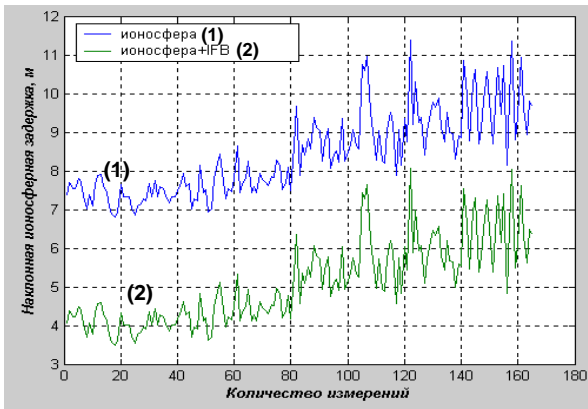


Рис. 1. Влияние IFB на точность определения ионосферной задержки двухчастотным методом

На рис. 1 показаны значения ионосферных задержек, полученные двухчастотным методом по кодовым измерениям станции GLSV (Голосеево, г. Киев) относительно спутника GPS с литерным номером PRN15 3 августа 2002 года. При этом, в одном случае (2) двухчастотные измерения представлены с учетом значения IFB, известного по результатам предварительных оценок, а в другом (1) – предполагалось, что IFB неизвестно.

В некоторых случаях ионосферные измерения в результате влияния IFB имеют отрицательный знак, что противоречит их физическому принципу, так как сигнал при прохождении ионосферы претерпевает групповую задержку (кодовые измерения) или фазовое ускорение (фазовые измерения). Такая картина наблюдается на перманентной станции в Полтаве (POLV), Ужгороде (UZHG), Львове (SULP), Николаеве (MIKL) и др. Это делает невозможным использование измерений данных станций для исследования ионосферы и формирования ионосферных коррекций в режиме дифференциальной навигации. Значение IFB передатчиков спутников может достигать единиц наносекунд. Эти данные доступны из навигационного сообщения спутников.

По своему физическому принципу систематическая погрешность IFB является медленноменяющейся погрешностью, которая зависит от положения антенно-фидерной системы, высокочастотных кабелей и аналоговых трактов приемника и температуры окружающей среды, которая меняется во времени. Значения IFB на интервале несколько часов можно считать постоянными. По результатам измерения всех пунктов наблюдения можно осуществлять периодическую оценку указанных значений. Важным в данном случае является использование измерений, выполненных в ночное время суток, когда ионосфера является наиболее спокойно и более точно моделируемой. С точностью до значений  $\Delta_c$  (см. (1)) величину ионосферной задержки можно представить в виде:

$$\frac{\widehat{I}_{\text{slant}}}{M(\beta)} = I_{\text{vert}} + \frac{\Delta_{\text{np}}}{M(\beta)}, \quad (2)$$

где  $\widehat{I}_{\text{slant}}$  и  $I_{\text{vert}}$  – наклонная (двухчастотные измерения) и вертикальная ионосферные задержки;  $M(\beta)$  – функция, отображающая изменение задержки в зависимости от угла места спутника.

Для оценки величины IFB по результатам двухчастотных измерений предлагается использовать метод наименьших квадратов. При этом оценку можно искать минимизацией целевой функции

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[ \Delta \widehat{I}_{ij} - \left( \widetilde{I}_{\text{vert};j} + \frac{\Delta_{\text{np};i}}{M(\beta_{ij})} \right) \right]^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $n$  – количество измерений, выполненных пунктом наблюдения (КС) на заданном интервале времени;  $m$  – количество видимых спутников GPS на заданном интервале времени;  $\widetilde{I}_{\text{vert};j}$  – значение вертикальной ионосферной задержки по теоретической модели ионосферы.

При проведении экспериментальных исследований для упрощения опи-

санного алгоритма при расчете значений  $\tilde{I}_{\text{vert}}$  была выбрана модель Клобушара, которая имеет удовлетворительную точность в ночное время суток (остаточные ошибки всего 20 ... 25 см), что определяет возможность ее практического применения в разработанном методе. Исходными данными для эксперимента являлись RINEX-файлы наблюдений GPS-станций, полученные на временном интервале 0...5 часов местного времени относительно всех видимых спутников на 3.08.02 г. При этом для проверки правильности функционирования алгоритма использовались измерения только тех станций, значения IFB которых были предварительно известны. Значения межчастотных смещений, известные априорно, и их оценки, полученные с использованием разработанного метода, представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Значения и оценки межчастотных смещений

	Значения IFB для станций наблюдения, м						
	GLSV	MDVO	JOZE	LAMA	ANKR	ZECK	ZWEN
<i>эталон</i>	-3,315	0,05	0,88	-5,4	1,58	-1,23	-0,61
<i>оценки</i>	-3,6	0,06	0,82	-4,87	0,9	-1,22	-0,3
$ \Delta , \text{ м}$	0,285	0,01	0,06	0,53	0,68	0,01	0,31

**Выводы.** Приведенные результаты свидетельствуют о хорошем согласии оценок IFB, полученных с использованием разработанного метода и эталонных значений. Рассогласование между эталонными и полученными результатами находится в пределах 1...60 см. Полученные результаты открывают возможность использования двухчастотных измерений ионосферы тех станций, IFB которых неизвестно. Только для перманентных станций на территории Украины применение такого метода позволит полноценно использовать результаты измерений 6 станций (Полтава, Ужгород, Львов, Симеиз, Николаев и Евпатория).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гофманн-Велленгоф Б., Лихтенеггер Г., Коллинз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): Теорія і практика. – К.: Наук. думка, 1995. – 380 с.
2. Grewal M.S., Brown W., Hsu P. Lucy R. Ionospheric Delay Validation using Dual Frequency Signal from GPS at GEO Uplink Subsystem Locations // ION GPS' 99. – 14 – 17 September, 1999. – Nashville, TN, USA. – P. 1429 – 1436.
3. Langley R., Fedrizzi M., et al. Mapping the Low-latitude Ionosphere with GPS // GPS Word. – February 2002. – Vol. 13, № 2. – P. 42 – 47.

Поступила 9.09.2003

*ДЕЙНЕКО Валерий Николаевич, начальник АХГ научного центра при ХВУ. Окончил*

*ХВУ в 1997 году. Область научных интересов – системы и комплексы спутниковой навигации и геодезии.*