

## Оценивание межчастотных задержек навигационных космических аппаратов

© Е. А. Карауш, Д. С. Печерица

ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, Моск. обл., Россия

### Реферат

Необходимым условием для решения навигационных задач по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BeuDou) является учет всех источников погрешностей измерений, в число которых входят задержки сигналов в радиочастотном тракте навигационных космических аппаратов. Особенно важно компенсировать эти погрешности для обеспечения высокоточных координатно-временных определений при использовании навигационных сигналов нескольких систем.

Цель работы – разработка способа определения межчастотных задержек сигналов навигационных космических аппаратов ГНСС. В качестве исходных данных предложено использовать псевдодальномерные измерения в поддиапазонах L1 и L2. Авторами рассмотрены сложности задачи определения межчастотных задержек, представлены результаты экспериментальных исследований и предложен новый способ оценивания таких задержек. Основная сложность в оценке таких задержек сигналов ГНСС – исключение погрешности измерений, вызванной задержкой сигналов в ионосферном слое Земли. Поэтому предлагаемый метод оценки межчастотных задержек включает в себя ряд условий: использование точной эфимеридно-временной информации, псевдодальномерных измерений в диапазонах L1 и L2, обработка измерений при малых значениях общего электронного содержания (ТЕС). Ключевая идея разработанного способа оценки межчастотных задержек сигналов состоит в использовании наблюдений только тех навигационных аппаратов ГНСС, взаимное положение которых отличается не более чем на 1°. Для оценивания задержек сигналов спутников всей орбитальной группировки отечественной системы ГЛОНАСС был выбран опорный аппарат с большим числом наблюдений, подходящих под перечисленные условия. Также в обработке участвовали наблюдения, полученные по различным парам спутников, но имеющие в составе один и тот же аппарат (например, пара спутников №11 (ГЛОНАСС) и №7 (GPS) и пара №11 (ГЛОНАСС) и №21 (ГЛОНАСС)). Таким образом проверялись результаты оценки задержек сигналов по разным парам навигационных аппаратов. Полученные результаты обработки псевдодальномерных измерений с помощью предложенного алгоритма показали принципиальную возможность получения межчастотных задержек навигационных космических аппаратов орбитальной группировки ГЛОНАСС.

**Ключевые слова:** глобальные навигационные спутниковые системы, ГЛОНАСС, задержка навигационного сигнала, навигационный космический аппарат, погрешности псевдодальномерных измерений.

*Контакты для связи:* Карауш Екатерина Андреевна ([khanykova\\_ea@vniiftri.ru](mailto:khanykova_ea@vniiftri.ru)).

*Статья поступила в редакцию 16.12.2019, принята к публикации 13.02.2020, опубликована 12.05.2020.*

**Для цитирования:** Карауш Е. А., Печерица Д. С. Оценивание межчастотных задержек навигационных космических аппаратов // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 52. С. 27–30.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.52.27-30>

## Estimation of Inter-Frequency Delays of Navigation Satellites

E. A. Karaush, D. S. Pecheritsa

Federal State Unitary Enterprise “National Research Institute for Physical and Technical and Radio Engineering Measurements”, Mendeleev, Moscow region, Russia

### Abstract

A necessary preliminary condition for solving of navigational problems by signals of global navigation satellite systems (GLONASS, GPS, Galileo, BeuDou) is to calculate all the sources of measurement errors, which include signal delays in radio frequency path of navigation satellites. Thus, it is important to correct these errors to provide high-precision time and coordinate determinations when using navigation signals from several GNSS.

The purpose of the paper is to create a method for estimating interfrequency delays in the signals of GNSS navigation satellites. Pseudorange measurements in sub-bands L1 and L2 are proposed as input data. In the present paper, the authors discuss the problems of identification of interfrequency delays, and present the results of experimental research as well as propose a new way to estimate these delays. The main problem is the exclusion of measurement errors caused by delayed signals in the ionospheric layer of the Earth. The proposed method of evaluating the interfrequency delays includes the following conditions: the use of precision ephemerides and time satellites data, the pseudo-range measurements in the L1 and L2 bands, the processing of measurements at small values of the total electronic content (TEC). The main idea was to use only observations of GNSS navigation satellites whose relative position did not differ by more than 1. A reference satellite with a large number of observations suitable for these conditions has been selected. The observations

were also processed for different pairs of satellites, but including the same one satellite (for example, a pair of satellites number 11 (GLONASS) and number 7 (GPS), and number 11 (GLONASS) and number 21 (GLONASS)). We checked the estimates of signal delays for different pairs of navigation satellites. The results obtained using the proposed algorithm showed a fundamental possibility of getting values of inter-frequency delays of GLONASS navigation satellites.

**Keywords:** Global Navigation Satellite Systems, GLONASS, navigation signal delays, navigation satellite, pseudorange errors.

*Contacts: Ekaterina Karaush (khanykova\_ea@vniiftri.ru).*

*Received December 16, 2019, accepted February 10, 2020, published May 12, 2020.*

**For citation:** Karaush E. A., Pecheritsa D. S. Estimation of inter-frequency delays of navigation satellites // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 52. P. 27–30.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.52.27–30>

## Введение

Тема межчастотных задержек сигналов ГНСС в последнее время привлекает всё большее внимание исследователей. Совместное использование систем ГЛОНАСС и GPS в точном позиционировании требует знания таких задержек сигналов в навигационном космическом аппарате (НКА) и в аппаратуре потребителя. Развитие новых ГНСС (Galileo и BeiDou) еще больше актуализирует необходимость определения межчастотных задержек.

Межчастотные задержки трактуются как эффект, порождающий систематические погрешности в псевдодальномерных измерениях, возникающие между двумя наблюдениями, полученными на разных частотах. Задержка сигнала НКА вызвана различиями в задержках в аналоговых и цифровых трактах блока генерации сигнала и излучающей антенны, которые неидентичны для различных типов сигналов [1]. Эти задержки необходимы для определения координат и шкалы времени потребителя, определения общего электронного содержания ТЕС (англ. Total Electron Content) ионосферы. Исследования показали, что межчастотные задержки сигналов НКА GPS варьируются в пределах от  $-10$  нс до  $10$  нс и для сигналов НКА ГЛОНАСС – от  $-10$  нс до  $8$  нс [2]. Несмотря на то что каждый НКА калибруется перед запуском на орбиту и значения передаются в составе навигационного сообщения ( $\Delta t_n$  [3]), всегда есть некоторые отклонения, возникающие при функционировании спутника в космическом пространстве [4]. Главная сложность в определении этих задержек сигналов – отсутствие возможности разделить задержки на борту НКА, в навигационной аппаратуре потребителя (НАП) и в ионосфере, поскольку эффекты зависят от частоты сигнала.

С 1998 г. Международная ГНСС-служба IGS учредила рабочую группу по оцениванию дифференциальных смещений кодовых измерений DCB (англ. Differential Code Bias) и разработке глобальных ионосферных карт. В настоящее время оценивание этих задержек осуществляется IGS как комбинированное решение по данным, предоставляемым аналитическими центрами: CODE – Center for Orbit Determination in Europe (Европейским центром определения орбит), JPL –

Jet Propulsion Laboratory (Лабораторией реактивного движения), ESA – European Space Agency (Европейским космическим агентством), UPC – Polytechnic University of Catalonia (Каталонским политехническим университетом) [4].

Точность оценок задержек прежде всего зависит от выбранной аналитическим центром модели ионосферного слоя Земли. Задержки НКА GPS и ГЛОНАСС оцениваются как суточные постоянные на основе моделирования глобального общего ТЕС по данным более чем 200 станций слежения. Значения DCB для GPS и ГЛОНАСС, а также ионосферные карты публикуются IGS в формате IONEX-файлов [5]. Однако анализ публикуемых IGS данных для системы GPS показывает постепенное изменение значений DCB в течение нескольких месяцев, а для некоторых НКА ГЛОНАСС могут наблюдаться скачки значений. Также задержки для разных НКА даже одной системы сильно отличаются, в том числе из-за ухудшения характеристик бортового оборудования.

В связи с тем что значения задержек сигналов НКА различны для каждого типа наблюдений и каждой частоты, решение такой задачи осложнено трудностью разделения значений ионосферной задержки, задержки НКА и задержки НАП. В данной работе представлен способ оценивания задержек сигналов НКА ГЛОНАСС по псевдодальномерным измерениям в диапазонах L1 и L2 с исключением зависимости от точности применяемой модели ионосферы.

## Описание способа оценивания межчастотных задержек НКА

Поставленная задача оценивания задержек сигналов НКА решалась по псевдодальномерным измерениям в диапазонах L1 и L2. Уравнение псевдодальности  $R$  включает в себя погрешности, порожденные задержками сигнала НКА и НАП:

$$R = \rho + c \times (\delta t_{sat} - \delta t_{res}) + b_{ion}(f_{sat}) + b_{trop} + b_{res}(f_{sat}) + b_{sat}(f_{sat}) + b_M + \varepsilon, \quad (1)$$

где  $\rho$  – геометрическая дальность между антенной НАП в эпоху приема и антенной НКА в эпоху излучения сигнала, м;

$c$  – скорость света, м/с;  
 $\delta t_{sat}$  – смещение шкалы времени бортовых часов НКА относительно системной шкалы времени, с;  
 $\delta t_{res}$  – смещение шкалы времени НАП относительно системной шкалы времени, с;  
 $b_{ion}(f_{sat}) = 40.3 \times \text{TEC} / f^2$  – ионосферная задержка сигнала, зависящая от полной электронной концентрации TEC и частоты навигационного сигнала  $f_{sat}$ , м;  
 $b_{trop}$  – тропосферная задержка сигнала, м;  
 $b_{res}(f_{sat})$  – задержка сигнала НАП, м;  
 $b_{sat}(f_{sat})$  – задержка сигнала НКА, м;  
 $b_M$  – многолучевость сигнала, м;  
 $\varepsilon$  – шум псевдодалномерных измерений, м [6].

Для оценивания  $b_{sat}(f_{sat})$  были рассчитаны значения геометрической дальности  $\rho$ , компенсированы уходы бортовых шкал времени НКА  $\delta t_{sat}$  с использованием высокоточной эфемеридно-временной информации, публикуемой Информационно-аналитическим центром ГЛОНАСС. Задержки сигнала на борту НКА  $d_{sat}(f_{sat})$  и в НАП  $d_{res}(f_{sat})$  считаются зависимыми от частоты сигнала и постоянными на определенном периоде времени. Использование калибруемой аппаратуры [7] позволило исключить составляющую  $b_{res}(f_{sat})$  из уравнения (1).

Ключевая идея предлагаемого алгоритма обработки состоит в использовании наблюдений тех НКА, взаимное положение которых отличается не более чем на  $1^\circ$ . Таким образом исключается проблема учёта влияния ионосферы на псевдодалномерные измерения.

Оценка межчастотных задержек осуществлялась на основе разности псевдодалномерностей между НКА А и В на одной эпохе измерений. Результатом этих разностей является разница задержек сигналов между НКА А и В в диапазонах L1 и L2. Однако в результатах остается погрешность, порожденная различным влиянием ионосферы на сигналы с разными частотами:

$$\Delta b^{AB}(L1) = (R^A - \rho^A - c \times \delta t^A) - (R^B - \rho^B - c \times \delta t^B) - 40.3 \times (\text{TEC} / f_A^2 - \text{TEC} / f_B^2).$$

В целях обеспечения наименьшего влияния ионосферы на сигналы в обработке учувствовали только измерения, полученные при малых значениях TEC.

Для расчета межчастотных задержек сигналов необходимо выбрать опорный НКА, относительно которого оцениваются значения для всей орбитальной группировки.

### Результаты оценивания межчастотных задержек сигналов НКА

Обрабатывались псевдодалномерные измерения с калиброванной НАП за период 01.09.2018

по 17.04.2019. За данный период получены данные по 6 парам спутников системы ГЛОНАСС. Для расчета задержек по всей орбитальной группировке ГЛОНАСС были привлечены также наблюдения по парам НКА ГЛОНАСС и GPS.

В качестве опорного был выбран НКА с наименьшим временем функционирования – спутник системы ГЛОНАСС R05 (№ 756). Относительно НКА R05 рассчитаны значения по всей орбитальной группировке ГЛОНАСС в соответствии со схемой, представленной на рис. 1.

В качестве иллюстрации приведён график разностей псевдодалномерных измерений для спутников R11 и R21 в диапазонах L1 и L2 (рис. 2). Рассматриваемый случай демонстрирует наличие межчастотной задержки в псевдодалномерных измерениях.

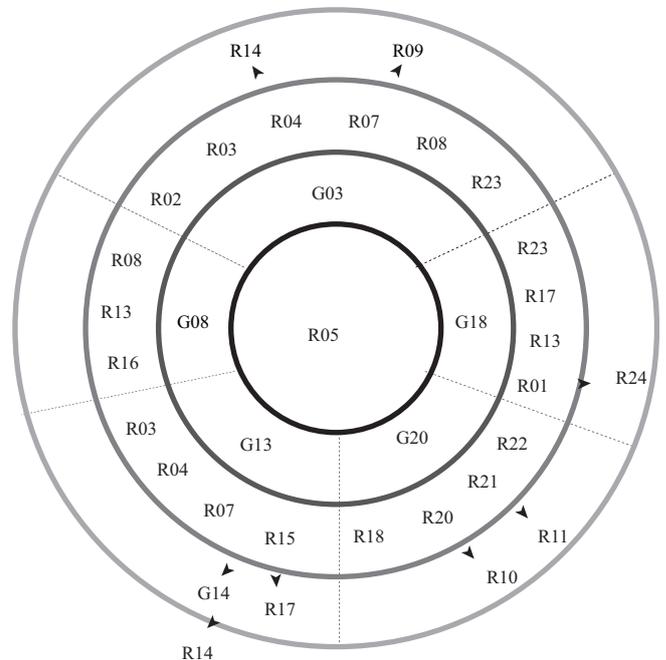


Рис. 1. Схема расчета межчастотных задержек сигналов с выбранным в качестве опорного НКА R05 (R – система ГЛОНАСС, G – система GPS)

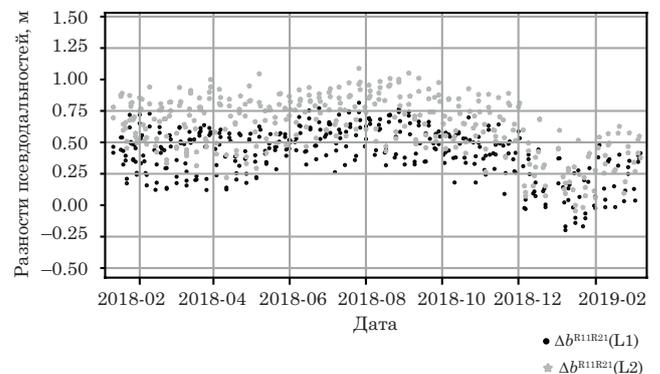


Рис. 2. Результаты обработки псевдодалномерных измерений по НКА R11 и R21 в диапазонах L1 и L2

## Заключение

Результаты обработки псевдодальномерных измерений с помощью предложенного метода показали принципиальную возможность получения оценок межчастотных задержек сигналов НКА орбитальной группировки ГЛОНАСС. Особенность реализации алгоритма оценивания межчастотных задержек:

- малое количество пар спутников системы ГЛОНАСС, в связи с чем привлекаются наблюдения спутников GPS;

- необходимость выбора опорного НКА, относительно которого будут рассчитываться значения задержек для орбитальной группировки;

- использование наблюдений при малых значениях ТЕС для минимизации остаточной погрешности, вызванной влиянием ионосферы.

## Литература

1. *Sardon E., Rius A., Zarraoa N.* Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total elec-

tron content from Global Positioning System observations // *Radio Sci.* 1994. Vol. 29, no. 3. P. 577–586.

2. *Wilson B., Mannucci A.* Instrumental biases in ionospheric measurement derived from GPS data. In: Paper presented at proceedings of the ION GPS-93, Salt Lake City, UT, USA, September 22–24, 1993. P. 1343–1351.

3. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2. Редакция 5.1. М.: РНИИКИП, 2008. 74 с. [Электронный ресурс]. URL: [http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD\\_GLONASS\\_rus\\_v5.1.pdf](http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf) (дата обращения: 16.12.2019).

4. *Subirana J. S., Zornoza J. M. J., Hernández-Pajares M.* GNSS Data Processing. Vol. I. Fundamentals and algorithms / ed. by Fletcher K. 2013. 238 p.

5. *Schaer S., Gurtner W., Feltens J.* IONEX: The Ionosphere map exchange format version 1.1 [Электронный ресурс]. URL: <http://ftp.aiub.unibe.ch/ionex/draft/ionex11.pdf> (дата обращения: 16.12.2019).

6. *Altamimi Z., Antreich F., Beard R. et al.* Springer handbook of global navigation satellite systems / ed. by P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck. Leipzig: Springer International Publishing AG, 2017. 1327 p.

7. *Печерица Д. С., Федотов В. Н.* Калибровка беззапросных измерительных систем ГЛОНАСС с обеспечением прослеживаемости к государственным первичным эталонам единиц величин // Тез. докл. конференции Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2017), Санкт-Петербург, 17–21 апреля 2017 г. СПб.: ИПА РАН, 2017. С. 204–205.