

Вычисление дифференциальных кодовых задержек и построение карт ионосферы с помощью ГНСС

© А. А. Аржанников, В. Д. Готов, В. В. Митрикас

АО «ЦНИИмаш», г. Королев, Россия

Реферат

Статья посвящена проблеме расчета карт полного электронного содержания ионосферы (ПЭС, англ. TEC) и калибровке навигационной аппаратуры с помощью измерений ГНСС на этапе эксплуатации. Актуальность темы обусловлена влиянием ионосферных задержек и транслируемых в навигационном кадре межчастотных задержек на точность местоопределения. Кратко представлены три различных способа уточнения дифференциальных кодовых задержек (DCB, англ. differential code biases) космических аппаратов и беззапросных измерительных станций для всех существующих ГНСС, а также методы построения локальных и глобальных карт TEC ионосферы.

Представлена оценка точности межчастотных задержек в навигационных кадрах всех ГНСС по данным Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения АО «ЦНИИмаш». Погрешность межчастотной задержки в навигационном кадре ГЛОНАСС значительно выше в сравнении с другими ГНСС (СКО более 0.5 м для ГЛОНАСС и менее 0.1 м для остальных ГНСС). Проведено сравнение четырех вариантов расчета DCB^{SC} космического аппарата ГЛОНАСС, все четыре набора DCB^{SC} имеют попарные СКО между собой менее 0.1 м. Также приведена оценка точности расчета глобальных ионосферных карт Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения: ~1.5 TECu на 1 августа 2021 г. (1 ед. TECu = 10¹⁶ электронов/м², что соответствует задержке в ~16 см для L1).

Ключевые слова: ГНСС, ГЛОНАСС, IONEX, GIM, TEC, DCB, ДКЗ, ПЭС, ионосфера, калибровка навигационной аппаратуры, глобальные карты ионосферы, локальные карты ионосферы, дифференциальные кодовые задержки, межчастотные задержки, модель Клобучара, полное электронное содержание.

Контакты для связи: Готов Владимир Дмитриевич (vladimir.glotov@glonass-iac.ru).

Для цитирования: Аржанников А. А., Готов В. Д., Митрикас В. В. Вычисление дифференциальных кодовых задержек и построение карт ионосферы с помощью ГНСС // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 60. С. 3–11. <https://doi.org/10.32876/AplAstron.60.3-11>

Estimation of Differential Code Biases and Ionosphere Maps Using GNSS

A. A. Arzhannikov, V. D. Glotov, V. V. Mitrikas

JSC "TsNIIMash", Korolev, Russia

Abstract

The article focuses on the problem of the Total Electron Content (TEC) estimation in the ionosphere and the calibration of navigation equipment using measurements of GNSS at the operational stage. The topic is relevant because of the influence of ionospheric delays and broadcasted inter-frequency delays on the positioning accuracy. Three different methods to estimate differential code biases (DCB) for a satellite and a receiver of all existing GNSS are briefly presented, as well as methods for constructing local and global maps of the TEC in the ionosphere.

The accuracy estimation of the broadcasted inter-frequency delays for all GNSS is presented according to the data from the Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing. The error of the GLONASS broadcasted inter-frequency delay is significantly higher in comparison with other GNSS (RMS deviation is more than 0.5m for GLONASS and less than 0.1 m for other GNSS). Comparing four methods of calculating GLONASS DCB^{SC} showed that all four DCB^{SC} sets have RMS deviation between themselves less than 0.1 m. The RMS deviation of other ionospheric maps in relation to the Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing is also presented: ~1.5 TECu for August 1, 2021 (1 TEC unit = 10¹⁶ electrons/m² which corresponds to a delay of ~16 cm for L1).

Keywords: GNSS, GLONASS, IONEX, GIM, TEC, DCB, ionosphere, Total Electron Content, calibration of navigation equipment, Global Ionosphere Maps, local ionosphere maps, Differential Code Bias, inter-frequency delays, Klobuchar model, Total Electron Content.

Contacts: Vladimir D. Glotov (vladimir.glotov@glonass-iac.ru).

For citation: Arzhannikov A. A., Glotov V. D., Mitrikas V. V. Estimation of differential code biases and ionosphere maps using GNSS // Transactions of IAA RAS. 2022. Vol. 60. P. 3–11. <https://doi.org/10.32876/AplAstron.60.3-11>

Введение

Погрешность местоопределения потребителя по измерениям ГНСС оценивается как произведение эквивалентной погрешности измерения дальности (ЭПД) и геометрического фактора (DOP). DOP зависит от количества и положения навигационных КА, а ЭПД состоит из трех составляющих:

- погрешность за счет космического сегмента (ошибки прогнозирования эфемеридно-временной информации (ЭВИ), межсигнальные, межлитерные и межчастотные временные задержки при излучении навигационных сигналов, разрядность);

- погрешность распространения сигнала в среде (ионосфера и тропосфера);

- погрешность за счет навигационной аппаратуры потребителя (НАП) (шум, многолучевость, межсигнальные, межлитерные и межчастотные временные задержки при приеме навигационных сигналов).

Далее в статье все виды межсигнальных, межлитерных и межчастотных временных задержек в соответствии с мировой практикой будут называться дифференциальными кодовыми задержками (англ. DCB — differential code biases). При этом отдельно рассматриваются транслируемые в навигационных кадрах ГНСС межчастотные задержки, которые в Интерфейсных контрольных документах (ИКД) зарубежных систем обозначаются Tgd (англ. Group Delay Differential, Timing Group Delay) ([IRN-IS-200H-003 9-DEC-2015](#); [OS-SIS-ICD v2.0](#); [Open Service Signal \(Version 2.1\)](#)), а в ИКД ГЛОНАСС ([ГНСС ГЛОНАСС. ИКД... Редакция 5.1](#)) — смещения излучаемых навигационных радиосигналов поддиапазона L2 относительно радиосигналов поддиапазона L1. Межчастотная задержка для ГЛОНАСС также обозначается как задержка АФНС (задержка в аппаратуре формирования навигационного сигнала).

В работе рассмотрены погрешности за счет распространения навигационного сигнала в ионосфере, а также методы расчета DCB^{SC} в аппаратуре КА и DCB_{GS} беззапросных измерительных станций (БИС). С помощью обработки общедоступных измерений глобально распределенной сети БИС Международной службы IGS (International GNSS Service) в Информационно-аналитическом центре координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) АО ЦНИИмаш на ежедневной основе строятся локальные и глобальные карты полного электронного содержания (ПЭС, англ. TEC — Total Electron Content) в ионосфере, результаты расчетов публикуются ([Раздел «Ионосфера» на сайте ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш»](#); [FTP-сервер ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш», директория ionex](#)) в виде файлов формата IONEX ([IONEX...Version 1.1](#)). Одновременно с параметрами ионосферных карт в ИАЦ КВНО уточняются

DCB^{SC} КА и DCB_{GS} БИС, которые публикуются на ежедневной основе ([FTP-сервер ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш», директория rapid](#)) в виде файлов формата [SINEX BIAS](#). Кратко описаны методы расчета межчастотных задержек и карт ПЭС ионосферы, представлена оценка точности межчастотных задержек Tgd в навигационных кадрах всех ГНСС по данным ИАЦ КВНО и зарубежного центра анализа IGS, а также точность расчета локальных и глобальных карт ПЭС ионосферы. Изложенные методы и результаты расчетов опубликованы в разделе «Ионосфера» на сайте ИАЦ КВНО ([Раздел «Ионосфера» на сайте ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш»](#)). Они также были представлены на Девятой Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2021), г. Санкт-Петербург ([Аржанников и др., 2021](#)).

Ионосфера — это ионизированная часть верхних слоев атмосферы Земли, расположенная на высотах от 50 до 1000 км, которая существенно воздействует на распространение радиоволн, в частности на сигналы ГНСС. Ионосферная задержка входит в состав измерений псевдодальности ГНСС в виде поправки, которая в первом приближении прямо пропорциональна наклонному ПЭС вдоль всего пути сигнала и обратно пропорциональна квадрату частоты сигнала.

При использовании двухчастотных приемников, относящихся в основном к оборудованию геодезического класса ([EUSPA EO and GNSS Market Report 2022](#)), влияние ионосферной задержки исключается с помощью использования безионосферной комбинации измерений на двух частотах. Однако для одночастотных приемников, составляющих основу сегмента гражданских приемников ([EUSPA EO and GNSS Market Report 2022](#)), ионосферные задержки вносят ошибку в местоопределение от единиц до нескольких десятков метров. Для компенсации этой ошибки необходимо построение карт распределения ПЭС ионосферы, а в составе навигационных кадров ГНСС и функциональных дополнений передавать потребителю параметры модели ионосферы.

Кроме того, на точность координатного решения влияют систематические задержки в аппаратуре КА и БИС. Определение этих задержек на этапе эксплуатации ГНСС стало возможным с появлением глобальных сетей БИС.

1. Модель измерений

Спутниковая навигация основывается на использовании принципа беззапросных дальномерных измерений между навигационными спутниками и потребителем. Представленная ниже модель навигационных измерений отличается от общепринятой тем, что в ней систематические кодовые ошибки разделены отдельно на ошибки

приемника и спутника, при этом систематические ошибки для каждого приемника в общем случае различны для каждого спутника. Это особенно актуально для системы ГЛОНАСС, поскольку позволяет учитывать особенности частотного разделения сигналов и более точно калибровать приемники.

Математическая модель измерений псевдодальностей открытых навигационных сигналов ГНСС стандартной точности (СТ) поддиапазонов L1 и L2 (C1C и C2C в обозначениях [\(RINEX... Version 3.05\)](#) может быть представлена в следующем виде:

$$P_{GS,C1}^{SC} = \overline{P_{GS}^{SC}} + I_{GS,1}^{SC} + b_{GS(SC),C1} + b_{C1}^{SC} + \varepsilon_{GS,C1}^{SC}$$

$$P_{GS,C2}^{SC} = \overline{P_{GS}^{SC}} + I_{GS,2}^{SC} + b_{GS(SC),C2} + b_{C2}^{SC} + \varepsilon_{GS,C2}^{SC},$$

где $\overline{P_{GS}^{SC}} = \overline{\rho_{GS}^{SC}} + T_{GS}^{SC} + c(dt_{GS} - dt^{SC})$ — расчетные значения псевдодальностей с учетом тропосферной погрешности T_{GS}^{SC} и смещений показаний часов БИС dt_{GS} и КА dt^{SC} (англ. GS — ground station, SC — spacecraft); $\overline{\rho_{GS}^{SC}}$ — истинная дальность; $b_{GS(SC),C1}$, $b_{GS(SC),C2}$ — систематические задержки БИС для C1C, C2C, которые в общем случае зависят и от КА; b_{C1}^{SC} , b_{C2}^{SC} — систематические задержки в бортовой аппаратуре КА для C1C, C2C; $\varepsilon_{GS,C1}^{SC}$, $\varepsilon_{GS,C2}^{SC}$ — шумовые погрешности кодовых измерений C1C, C2C псевдодальности КА и БИС.

Ионосферная задержка I_{GS}^{SC} зависит от частоты сигнала f и наклонного ПЭС (англ. STEC — slant TEC) вдоль всего пути сигнала ([\(Montenbruck, et al., 2014; Schaer, 1999\)](#))

$$I = \frac{k}{f^2} \cdot \text{STEC}, \text{ где } k \approx 40.31 \frac{\text{М}^3}{\text{с}^2}.$$

Суммарная задержка DCB_{GS}^{SC} равна сумме задержек DCB^{SC} за счет КА и DCB_{GS} за счет БИС, определяется следующим образом:

$$\text{DCB}_{GS,C1-C2}^{SC} = \text{DCB}_{GS(SC),C1-C2} + \text{DCB}_{C1-C2}^{SC} =$$

$$= (b_{GS(SC),C1} - b_{GS(SC),C2}) + (b_{C1}^{SC} - b_{C2}^{SC})$$

Для расчета карт ПЭС ионосферы и суммарных задержек DCB_{GS}^{SC} используется так называемая безгеометрическая комбинация кодовых измерений на двух частотах ([\(Montenbruck, et al., 2014; Schaer, 1999\)](#)):

$$P_{GS,C1-C2}^{SC,GF} = P_{GS,C1}^{SC} - P_{GS,C2}^{SC} =$$

$$= 40.31 \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \cdot \text{STEC} + \text{DCB}_{GS,C1-C2}^{SC} + \varepsilon_{GS,C1-C2}^{SC,GF}$$

Однослойные модели ионосферы построены на предположении, что все свободные электроны ионосферы расположены в бесконечно тонком слое на некоторой высоте над поверхностью Земли (рис. 1). Наклонное ПЭС (STEC) определяется умножением вертикального ПЭС (англ. VTEC — vertical TEC) на функцию отображения $m(E)$, которая зависит от угла места E , высоты слоя ионосферы ($h = 450$ км) и радиуса Земли R_{\oplus} ([\(Montenbruck, et al., 2014; Schaer, 1999\)](#)):

$$\text{STEC} = \text{VTEC} \cdot m(E) = \text{VTEC} \cdot \frac{1}{\sin(E')}$$

$$\cos(E') = \frac{R_{\oplus}}{R_{\oplus} + h} \cdot \cos(E),$$

где E' — угол места точки прокола ионосферы.

Строгое разделение наблюдаемой каждой станцией суммарной задержки DCB_{GS}^{SC} на составляющие за счет КА и за счет БИС невозможно. Поэтому для такого разделения используются дополнительные условия: в частности, предположение о равенстве нулю суммы всех бортовых межчастотных задержек или, например, использование некоторого эталона, в качестве которого может выступать «средний приемник по сети» либо несколько выбранных откалиброванных приемников ([\(Митрикас и др., 2021\)](#)). Таким образом, расчет межчастотных задержек проводится в 2 этапа:

— на первом этапе рассчитываются суммарные задержки DCB_{GS}^{SC} для всех пар КА-БИС по измерениям сети глобально распределенных БИС;

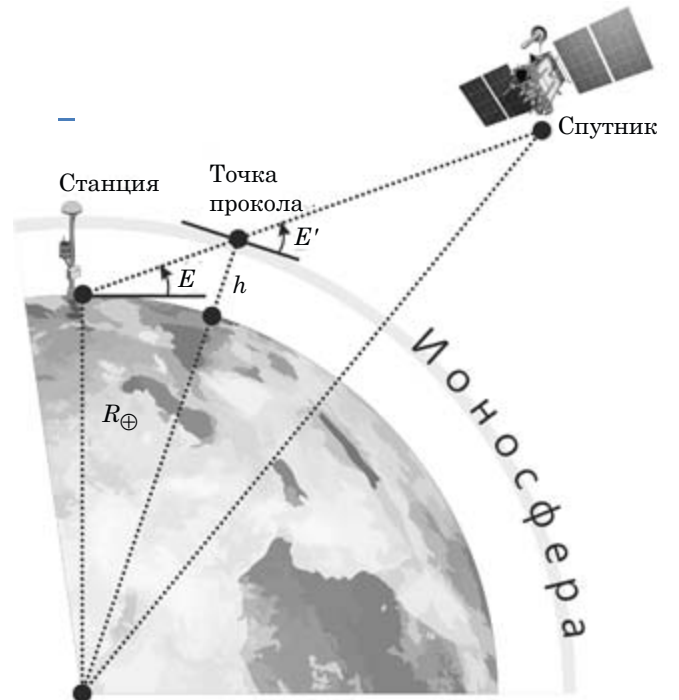


Рис. 1. Однослойная модель ионосферы

$$P_{GS,C1-C2}^{SC,GF} = P_{GS,C1}^{SC} - P_{GS,C2}^{SC} = 40.31 \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \cdot \text{STEC} + \text{DCB}_{GS,C1-C2}^{SC} + \varepsilon_{GS,C1-C2}^{SC,GF}$$

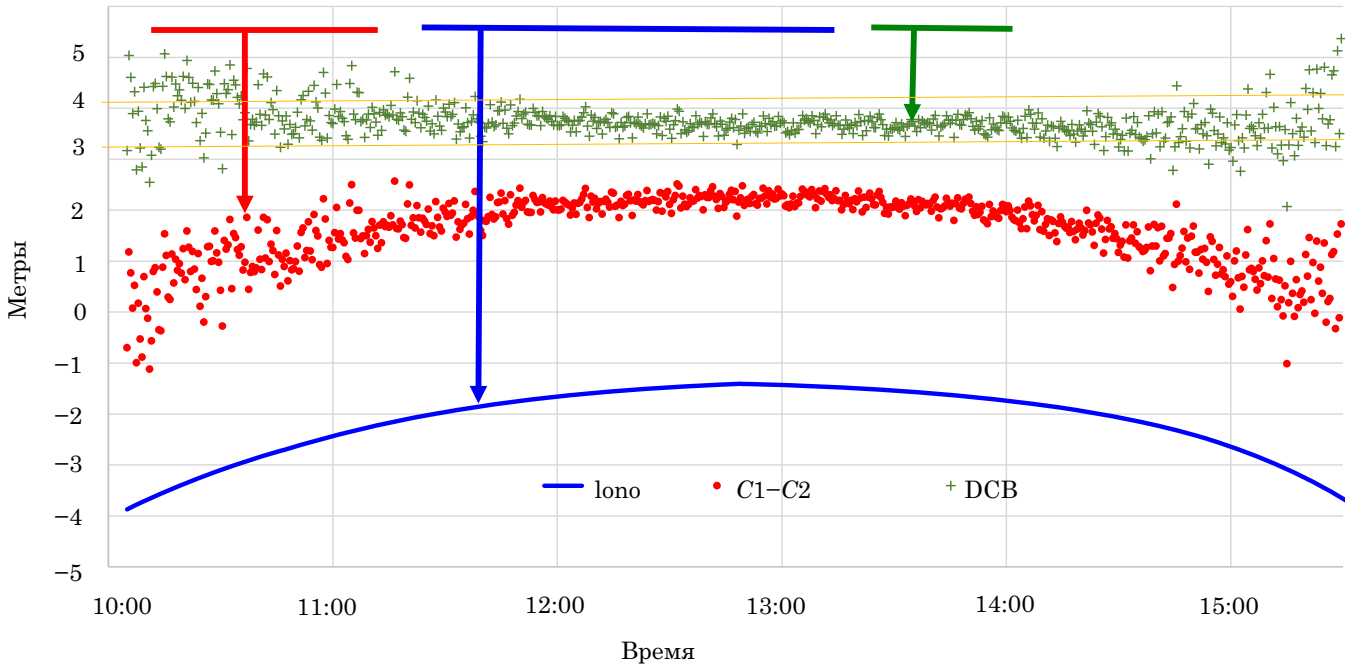


Рис. 2. Вычисление суммарной задержки DCB_{GS}^{SC} для одной пары КА-БИС

— на втором этапе происходит разделение суммарных задержек DCB_{GS}^{SC} на составляющие DCB^{SC} за счет КА и DCB_{GS} за счет БИС.

Далее рассмотрены три различных способа расчета карт ПЭС ионосферы и DCB.

2. Методы расчета карт ПЭС ионосферы и дифференциальных кодовых задержек

2.1. Вычисление DCB с помощью существующих карт ионосферы

Первый представленный способ уточнения суммарных задержек DCB_{GS}^{SC} относительно прост и применяется, когда ионосферная задержка заранее известна (Montenbruck, et al., 2014). Например, можно использовать существующие глобальные карты ПЭС ионосферы (англ. GIM — global ionosphere maps), которые публикуются в виде файлов формата IONEX зарубежными центрами анализа IGS (FTP-сервер CDDIS; [FTP-сервер CDDIS](#); [FTP-сервер Уханьского университета](#)) и ИАЦ КВНО ([FTP-сервер ИАЦ КВНО АО «ЦНИИ-маш»](#), [директория ionex](#)).

Для определения суммарной задержки DCB_{GS}^{SC} достаточно измерений одной станции по одному КА на суточном интервале, DCB_{GS}^{SC} уточняется как среднее арифметическое всех безгеометрических комбинаций измерений:

$$\text{DCB}_{GS,C1-C2}^{SC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(P_{GS,C1-C2}^{SC,GF} - I_{GS}^{SC,GF} \right)_i,$$

где эквивалентная ионосферная задержка для безгеометрической комбинации определяется по ранее описанному принципу:

$$I_{GS}^{SC,GF} = 40.31 \cdot \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \cdot m(E) \cdot \text{VTEC}.$$

На рис. 2 представлен процесс вычисления суммарных задержек DCB_{GS}^{SC} . Из безгеометрической комбинации измерений («точки») вычитается известная ионосферная задержка («линия»), и полученная разность усредняется («крестики»). Таким образом вычисляется искомое значение DCB_{GS}^{SC} .

2.2. Расчет параметров локальной карты ПЭС ионосферы и значений DCB

Второй метод заключается в одновременном уточнении суммарных задержек DCB_{GS}^{SC} и параметров локальной ионосферы. Преимуществом данного метода является его автономность и лучшая точность. Метод моделирования локальной ионосферы в виде двумерного полинома был предложен в 1999 г. (Schaer, 1999). Позднее этот метод был усовершенствован: к полиному добавилось дополнительное слагаемое в виде разложения в конечный ряд Фурье (Wang, et al., 2016; Li, et al., 2012).

Распределение ПЭС в локальной области станции моделируется в зависимости от географической широты φ и солнечно-фиксированной долготы t точки прокола ионосферы:

$$VTEC(\varphi, t) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^{m_{\max}} \{E_{nm}(\varphi - \varphi_0)^n \cdot t^m\} + \sum_{k=0}^{k_{\max}} \{C_k \cos(kt) + S_k \sin(kt)\},$$

где φ — географическая широта точки прокола ионосферы; φ_0 — географическая широта БИС; $t = \lambda - \lambda_{\text{SUN}}$ — географическая долгота точки прокола ионосферы, скорректированная на положение Солнца (соответствует местному солнечному времени); E_{nm} — неизвестные коэффициенты полинома; C_k и S_k — неизвестные коэффициенты разложения в ряд Фурье.

Расчет выполняется для одной станции и всех наблюдаемых КА методом наименьших квадратов (МНК). На суточном интервале уточняются параметры локальной ионосферы (степень полинома m_{\max} , $n_{\max} = 4$, количество коэффициентов ряда Фурье $k_{\max} = 4$), а также все суммарные задержки $DCB_{\text{GS}}^{\text{SC}}$ для данной станции и всех КА, в качестве исходных данных используются безгеометрические комбинации измерений псевдодальности (по аналогии с первым способом).

Точки прокола ионосферы и примерная область уточнения параметров ионосферы по наблюдениям станции ZECK на суточном интервале представлены на рис. 3.

После расчета параметров локальной модели ионосферы и суммарных задержек $DCB_{\text{GS}}^{\text{SC}}$, суммарные задержки разделяются на составляющие



Рис. 3. Точки прокола ионосферы для одной станции на суточном интервале

DCB^{SC} за счет КА и DCB_{GS} за счет БИС (Wang, et al., 2016; Li, et al., 2012). Результаты расчетов хранятся в файлах формата SINEX_BIAS (SINEX_BIAS... Version 1.00), которые публикуются центрами анализа международной службы IGS (FTP-сервер IGN), а также с 2017 г. ИАЦ КВНО (FTP-сервер ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмап», директория rapid).

2.3. Построение глобальных карт ПЭС ионосферы (ГИМ) и расчет DCB

Построение глобальных карт ПЭС ионосферы (ГИМ) схоже с расчетом локальных карт ионосферы по измерениям одной БИС, но для вычисления используется уже глобально распределенная сеть станций. С помощью МНК уточняются одновременно задержки DCB^{SC} для всех КА, DCB_{GS} для всех БИС, а также распределение вертикального ПЭС ($VTEC$) в ионосфере в виде разложения по сферическим гармоникам в зависимости от широты и солнечно-фиксированной долготы:

$$VTEC(\varphi, t) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^{m_{\max}} P_{nm}(\sin\varphi) \{C_{nm} \cos(mt) + S_{nm} \sin(mt)\},$$

где φ — широта точки прокола ионосферы; $t = \lambda - \lambda_{\text{SUN}}$ — долгота точки прокола ионосферы, скорректированная на положение Солнца; P_{nm} — нормированные присоединенные функции Лежандра; C_{nm} и S_{nm} — неизвестные коэффициенты сферических функций.

В модели могут использоваться как географические, так и геомагнитные координаты.

Данный метод расчета глобальных карт ПЭС ионосферы был опубликован в 1999 г. (Schaer, 1999). При этом уточнялся один набор значений DCB^{SC} , DCB_{GS} и один набор коэффициентов сферических функций для суточного интервала. Затем метод был усовершенствован: стали уточняться 25 или 13 наборов коэффициентов разложения по сферическим функциям для 1-часового или 2-часового шага расчета. При определении коэффициентов для последовательных моментов времени может добавляться условие связи, например кусочно-линейная зависимость (Zhang, et al., 2018):

$$X(t) = (1 - \Delta_i(t))X(T_i) + \Delta_i(t)X(T_{i+1}), \quad i = 1, \dots, 25,$$

где $X(t)$ — коэффициент разложения по сферическим функциям в момент времени t ; $X(T_i)$ и $X(T_{i+1})$ — уточняемые коэффициенты разложения;

$\Delta_i(t) = \frac{t - T_i}{T_{i+1} - T_i}$ — вес момента времени t между T_i и

T_{i+1} .

Пик ионосферной активности в течение суточного цикла приходится примерно на 14:00 по местному солнечному времени $t = \lambda - \lambda_{\text{SUN}}$. Другими словами, пик ионосферной активности следует

за пиком солнечной активности с отставанием примерно на 2 ч в течение суток. При расчете глобальных карт ПЭС ионосферы суточный цикл ионосферы позволяет уточнять параметры ионосферы в географических зонах, где отсутствуют измерения (в частности, над океанами): существующие измерения экстраполируются с низким весом на 15° в западном направлении со сдвигом во времени на 1 ч вперед.

3. Разделение суммарных задержек DCB на сумму составляющих за счет КА и КА

Вне зависимости от способа расчета (с использованием существующих карт ионосферы, либо совместно с расчетом локальных или глобальных карт ПЭС ионосферы), полученные суммарные задержки DCB^{SC}_{GS} могут быть разделены на сумму составляющих DCB^{SC} за счет КА и DCB_{GS} за счет БИС только с наложением некоторого ограничения.

Расчет происходит по совокупности выбранных станций с помощью МНК. Это может быть вся глобальная сеть, либо приемники одного производителя, либо один эталонный калиброванный приемник (Митрикас и др., 2021). В подходе IGS для каждого КА и каждой БИС уточняется лишь одно значение DCB_{GS}. Получаемые таким образом DCB^{SC} за счет КА относятся к некоторому «среднему приемнику». Для снятия ненаблюдаемости в задаче МНК добавляется условие равенства нулю задержек «среднего КА» (суммы DCB^{SC} для всех КА орбитальной группировки системы):

$$\begin{cases} DCB_{GS[j],C1-C2}^{SC[i]} = DCB_{GS[j],C1-C2} + DCB_{C1-C2}^{SC[i]} \\ \sum_{i=1}^n DCB_{C1-C2}^{SC[i]} = 0, \quad i = 1 \dots n, j = 1 \dots m \end{cases}$$

Однако возможен и другой подход к разделению суммарных задержек DCB^{SC}_{GS}, учитывающий литерную зависимость. В этом случае для каждой станции дополнительно уточняется линейная

зависимость от номера литеры КА ГЛОНАСС, либо в общем случае до 14 значений DCB_{GS} (от -7 до +6 согласно ГНСС ГЛОНАСС. ИКД... Редакция 5.1).

4. Расчет и оценка точности межчастотной задержки Tgd в кадре для всех ГНСС

Чтобы оценить точность межчастотной задержки АФНС в кадре ГЛОНАСС, значения DCB^{SC} КА были рассчитаны в ИАЦ КВНО на 1 августа 2021 г. тремя различными представленными способами. Также для сравнения использовались DCB^{SC}, вычисленные независимым зарубежным центром анализа IGS (FTP-сервер IGN). Таким образом, полученные четырьмя различными способами величины DCB^{SC} КА сравнивались между собой, а также со значениями, передаваемыми в навигационном кадре (ГНСС ГЛОНАСС. ИКД... Редакция 5.1; IRN-IS-200H-003 9-DEC-2015; OS-SIS-ICD v2.0; Open Service Signal (Version 2.1)). Расчет проводился для КА ГЛОНАСС и других ГНСС.

В соответствии с ИКД ГЛОНАСС (ГНСС ГЛОНАСС. ИКД... Редакция 5.1) бортовая ЭВИ привязана к измерениям C1P, т. е. для двухчастотного приемника требуется учет передаваемого в составе навигационных сообщений взаимного смещения Δτ_n между навигационными сигналами на разных частотах. Для ГЛОНАСС межчастотная задержка Δτ_n (задержка АФНС) является DCB^{SC} КА с обратным знаком:

$$T_{gd} = b_{P2}^{SC} - b_{P1}^{SC} = -DCB_{P1-P2}^{SC} \quad (\text{для ГЛОНАСС}).$$

В табл. 1 приведены результаты попарного сравнения значений DCB^{SC} и задержки из навигационного кадра ГЛОНАСС. Все четыре способа расчета DCB^{SC} (три способа ИАЦ КВНО и один по расчетам зарубежного центра анализа) согласуются друг с другом лучше 10 см. При этом отличие межчастотной задержки в навигационном кадре

Таблица 1

Попарные СКО расчета DCB^{SC} и задержки АФНС ГЛОНАСС, 1 авг. 2021 г., м (значения для C1P – C2P \ C1C – C2C)

Попарные СКО DCB ^{SC} (C1–C2 и P1–P2) и задержки АФНС из кадра ГЛОНАСС, м	Два значения: C1P – C2P \ C1C – C2C				
	1. ИАЦ + CODE GIM	2. ИАЦ Локальная	3. ИАЦ Глобальная	4. IGS	5. Кадр АФНС
1. ИАЦ + CODE GIM		0.10 \ 0.09	0.04 \ 0.02	0.04 \ 0.04	0.61 \ 0.75
2. ИАЦ Локальная	0.10 \ 0.09		0.08 \ 0.09	0.08 \ 0.08	0.54 \ 0.72
3. ИАЦ Глобальная	0.04 \ 0.02	0.08 \ 0.09		0.03 \ 0.05	0.59 \ 0.75
4. IGS	0.04 \ 0.04	0.08 \ 0.08	0.03 \ 0.05		0.59 \ 0.74
5. Кадр АФНС	0.61 \ 0.75	0.54 \ 0.72	0.59 \ 0.75	0.59 \ 0.74	

СКО расчета DCB^{SC} и задержек Tgd, 1 авг. 2021 г., м

ГНСС	DCB ^{SC} и Tgd	Кадр vs ИАЦ КВНО	Кадр vs IGS	IGS vs ИАЦ КВНО
GPS	DCB(C1W–C2W) vs Tgd	0.06	0.08	0.04
GALILEO	DCB(C1X–C5X) vs Tgd(E1–E5a)	0.08	0.08	0.03
	DCB(C1X–C7X) vs Tgd(E1–E5b)	0.05	0.04	0.02
BeiDou	BDS-2 DCB(C2I–C6I) vs Tgd(B3–B1)	0.08	0.08	0.07
	BDS-3 DCB(C2I–C6I) vs Tgd(B3–B1)	0.21	0.2	0.05
ГЛОНАСС	DCB(C1P–C2P) vs Tgd (АФНС)	0.54	0.59	0.08

ГЛОНАСС от расчетных значений DCB^{SC} КА составляет примерно 60 см для C1P–C2P и 75 см для C1C–C2C.

По результатам расчетов ИАЦ КВНО за 2017–2021 гг. ([FTP-сервер ИАЦ КВНО АО «ЦНИИ-маш», директория rapid](#)) для всех КА системы ГЛОНАСС значения DCB^{SC} стабильны во времени и являются медленно меняющимися величинами с колебаниями менее 10 см. Для сравнения, цена младшего разряда межчастотной задержки в навигационном кадре ГЛОНАСС составляет 27 см ([ГНСС ГЛОНАСС. ИКД... Редакция 5.1](#)).

Далее приведена оценка точности межчастотных задержек Tgd в кадре остальных ГНСС по сравнению с расчетными значениями DCB^{SC} КА по расчетам ИАЦ КВНО и зарубежного центра анализа IGS (табл. 2). Связь между межчастотными задержками Tgd и DCB^{SC} КА определяется следующим образом:

$$T_{gd} = -\frac{DCB_{GS,P1-P2}^{SC}}{\gamma - 1} \approx -1.54 \cdot DCB_{GS,P1-P2}^{SC},$$

$$\gamma = \frac{f_1^2}{f_2^2} = \frac{77^2}{60^2} \approx 1.6469 \quad (\text{для GPS})$$

$$T_{gd(E1-E5a)} = -\frac{DCB_{E1-E5a}^{SC}}{\gamma - 1} \approx -1.26 \cdot DCB_{E1-E5a}^{SC},$$

$$\gamma = \frac{f_{E1}^2}{f_{E5a}^2} \approx 1.7933 \quad (\text{для GALILEO})$$

$$T_{gd(B3-B1)} = -DCB_{B1-B3}^{SC} = b_{B3}^{SC} - b_{B1}^{SC} \quad (\text{для BeiDou}).$$

В GPS бортовая ЭВИ привязана к измерениям безионосферной комбинации C1P–C2P. Поэтому для двухчастотных приемников GPS не требуется учет межчастотной задержки; она должна учитываться при использовании одночастотных приемников. В GALILEO, по аналогии с GPS, бортовая ЭВИ привязана к измерениям безионосферной комбинации, но передаются две поправки для (E1–E5a) и (E1–E5b). В BeiDou бортовая ЭВИ при-

вязана к измерениям B3; передаются две поправки для (B3–B2) и (B3–B1).

Разброс фактических значений межчастотных задержек КА примерно одинаков для трех ГНСС: от +2 м до –2 м для ГЛОНАСС и GPS, от +3 м до –1.5 м для GALILEO. У BeiDou более высокий разброс задержек от +8 м до –12 м. При этом, как видно из табл. 2, погрешность межчастотной задержки в кадре ГЛОНАСС выше в сравнении с другими ГНСС. Такое расхождение связано с тем, что для ГЛОНАСС межчастотная задержка АФНС в кадре не меняется в ходе эксплуатации КА, а для других ГНСС происходит перерасчет заложенной в навигационный кадр задержки раз в несколько месяцев.

5. Расчет и оценка точности глобальных карт ПЭС ионосферы (GIM)

Построение глобальных карт ПЭС ионосферы (GIM) с помощью измерений ГНСС востребовано в области космической погоды и дистанционного зондирования Земли. Основой для построения глобальных карт служит мировая общедоступная сеть БИС, развернутая международной службой IGS, функционирующей с 1994 г. В ИАЦ КВНО для уточнения параметров глобальных карт ПЭС ионосферы используются открытые измерения около 300 станций данной сети. Глобальные карты ПЭС ионосферы по расчетам ИАЦ КВНО (рис. 4) публикуются в файлах формата IONEX на ежедневной основе ([Раздел «Ионосфера» на сайте ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш»; FTP-сервер ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш», директория ionex](#)) с пространственным разрешением 2.5° по широте, 5° по долготе с шагом по времени 2 ч.

Карты ПЭС ионосферы рассчитываются в различных центрах анализа с использованием разных методов и исходных данных, но они могут быть представлены в стандартном формате IONEX в виде точечной сетки: по широте от +87.5° до –87.5° с шагом 2.5°, по долготе от –180° до +180° с

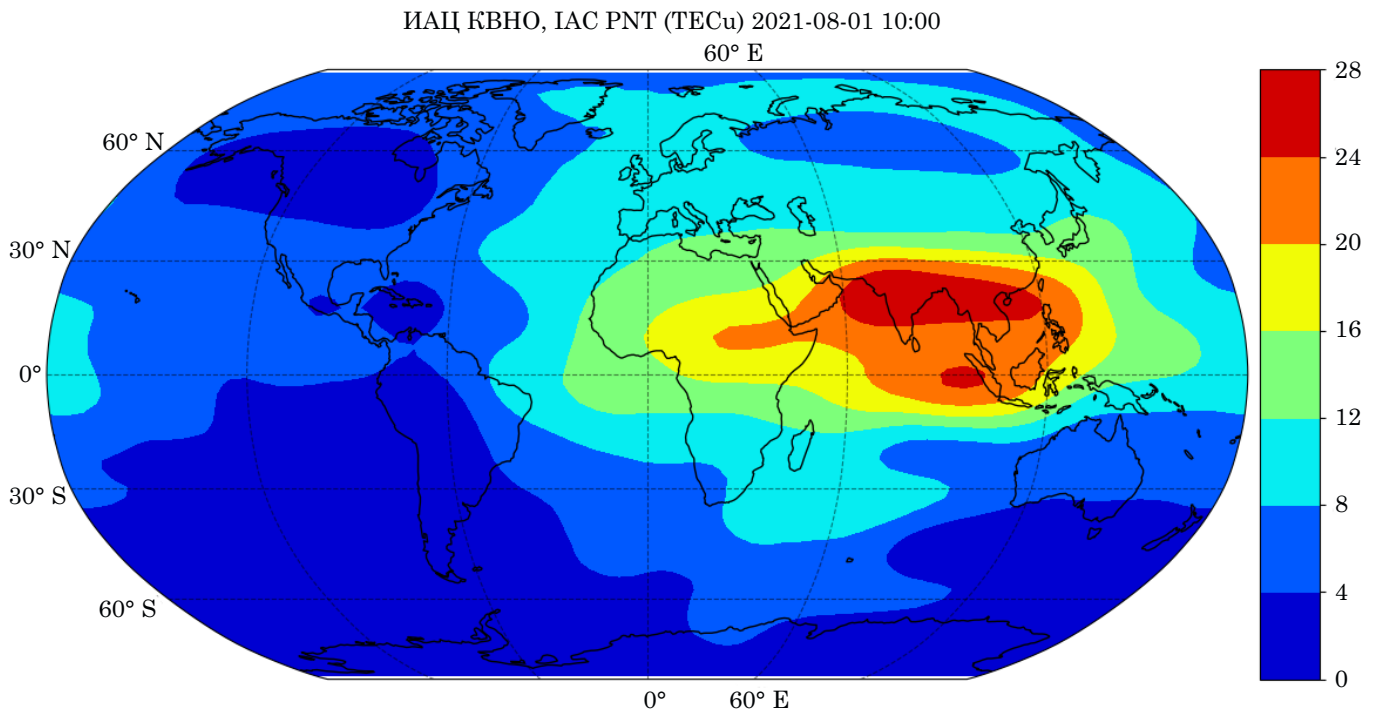


Рис. 4. Глобальная карта ионосферы ИАЦ КВНО на 2021.08.01 10:00 UTC

шагом 5° (итого 5183 значений), разрешение по времени от 00:00 до 00:00 следующих суток с шагом 1 ч или 2 ч (25 или 13 наборов данных).

В качестве оценки точности одной карты относительно другой выступает СКО соответствующих значений из файлов IONEX на суточном интервале (с исключением разницы средних значений карт ПЭС ионосферы) (Zhang, et al., 2018):

$$\begin{cases} bias_{IACG-CORG} = \langle VTEC_{IACG} \rangle - \langle VTEC_{CORG} \rangle \\ STD_{IACG-CORG} = \sqrt{\langle (VTEC_{IACG} - VTEC_{CORG} - bias_{IACG-CORG})^2 \rangle}, \end{cases}$$

где $VTEC_{IACG}$ и $VTEC_{CORG}$ — значения из файлов IONEX, $\langle \rangle$ — оператор усреднения.

В табл. 3 приведены результаты взаимного сравнения глобальных карт ионосферы ИАЦ КВНО и карт трех зарубежных центров анализа (CODE — Европейский центр определения орбит, ESOC — Европейский центр управления космическими полётами, JPL — Лаборатория реактивного движения NASA), а также упрощенной модели из кадра GPS.

Карты ИАЦ КВНО и других центров анализа согласуются на уровне 1.2–1.5 TEC_u, причем над материками — лучше и над океанами — хуже. Отклонения значений ПЭС ионосферы из кадра GPS составляют примерно 4.5 единиц TEC_u (1 ед. TEC_u = 10^{16} электронов/м², что соответствует 0.16 м для навигационного сигнала L1).

Таблица 3

Результаты сравнения глобальных карт ионосферы за 1 авг. 2021 г.

Попарные СКО значений ПЭС из глобальных карт ионосферы (TEC _u)					
Над материками \ По всей территории Земли \ Над океанами					
Карта	CODE	ESOC	JPL	ИАЦ КВНО	Кадр GPS
CODE		0.85 \ 0.93 \ 0.96	0.96 \ 1.04 \ 1.06	1.05 \ 1.17 \ 1.2	3.95 \ 4.7 \ 4.91
ESOC	0.85 \ 0.93 \ 0.96		1.24 \ 1.5 \ 1.57	1.07 \ 1.19 \ 1.22	3.82 \ 4.47 \ 4.65
JPL	0.96 \ 1.04 \ 1.06	1.24 \ 1.5 \ 1.57		1.29 \ 1.48 \ 1.53	3.99 \ 4.92 \ 5.17
ИАЦ КВНО	1.05 \ 1.17 \ 1.2	1.07 \ 1.19 \ 1.22	1.29 \ 1.48 \ 1.53		3.63 \ 4.23 \ 4.39
Кадр GPS	3.95 \ 4.7 \ 4.91	3.82 \ 4.47 \ 4.65	3.99 \ 4.92 \ 5.17	3.63 \ 4.23 \ 4.39	

Выводы

В работе представлены три различных метода расчета DCB_{GS} , DCB^{SC} и построения карт ПЭС ионосферы. Проведено сравнение четырех вариантов расчета DCB^{SC} КА ГЛОНАСС (три ИАЦ КВНО и один по расчетам зарубежного центра анализа IGS). Все четыре набора задержек DCB^{SC} согласуются друг с другом лучше 10 см. На 1 авг. 2021 г. точность расчета глобальных карт ПЭС ионосферы ИАЦ КВНО составила 1.5 ТЕСу.

Погрешность межчастотной задержки АФНС в навигационном кадре ГЛОНАСС значительно больше по сравнению с другими ГНСС: СКО составляет более 0.5 м для ГЛОНАСС и менее 0.1 м для остальных ГНСС. При этом межчастотные задержки отличаются для различных типов сигналов (С1С–С2С и С1Р–С2Р).

По результатам анализа ИАЦ КВНО за 2017–2021 гг. межчастотные задержки КА ГЛОНАСС и других ГНСС являются медленно меняющимися величинами. Для ГЛОНАСС существует потенциал для улучшения точности местопредопределения за счет оперативного уточнения межчастотных задержек АФНС, передаваемых в навигационных кадрах.

Литература

- Аржанников А. А., Глотов В. Д., Митрикас В. В. Вычисление аппаратных дифференциальных задержек и построение карт ионосферы с помощью ГНСС // «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2021), Санкт-Петербург, 13 сентября 2021.
- Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС // Интерфейсный контрольный документ. Навигационные радиосигналы в диапазонах L1, L2. Редакция 5.1. 2008.
- Митрикас В. В., Скакун И. О., Аржанников А. А., Федотов В. Н. Применение калиброванного навигационного приемника для оценки погрешности измерения за счёт космического сегмента (SISRE) ГЛОНАСС // «Альманах современной метрологии». 2021. № 2 (26). С. 79–103.
- Раздел «Ионосфера» на сайте ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.glonass-iac.ru/iono/> (дата обращения: 01.02.2022).
- FTP-сервер ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш», директория ionex [Электронный ресурс]. URL: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/ionex/> (accessed: 01.06.2022).
- FTP-сервер ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш», директория rapid [Электронный ресурс]. URL: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/YYDDD/rapid/> (дата обращения: 01.02.2022).
- FTP-сервер Уханьского университета (КНР), директория ionosphere [Электронный ресурс]. URL: <ftp://igs.gnsswhu.cn/pub/whu/MGEX/ionosphere/> (дата обращения: 01.02.2022).
- FTP-сервер CDDIS (США), директория ionex [Электронный ресурс]. URL: <ftp://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/> (дата обращения: 01.02.2022).
- FTP-сервер IGN (Франция), директория dcdb [Электронный ресурс]. URL: <ftp://igs.ign.fr/pub/igs/products/mgex/dcdb/> (дата обращения: 01.02.2022).
- BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document. Open Service Signal (Version 2.1). China Satellite Navigation Office. Nov. 2016.
- European GNSS (GALILEO) Open Service. Signal-in-Space Interface control document (OS-SIS-ICD v2.0). Jan. 2021. URL: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_OS_SIS_ICD_v2.0.pdf (accessed: 01.02.2022).
- EUSPA EO and GNSS Market Report 2022. URL: <https://www.euspa.europa.eu> (accessed: 01.02.2022).
- Global positioning systems directorate systems engineering & integration interface specification IS-GPS-200. NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Segment Interfaces (IRN-IS-200H-003 9-DEC-2015).
- IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1.1. Stefan Schaer, Werner Gurtner. Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland.
- Li Z., Yuan Y., Li H., Ou J., Huo X. Two-step method for the determination of the differential code biases of COMPASS satellites // J. Geodesy. 2012. Vol. 86. P. 1059–1076.
- Montenbruck O., Hauschild A., Steigenberger P. Differential code bias estimation using multi-GNSS observations and global ionosphere maps // Navigation. 2014. № 61. P. 191–201.
- RINEX. The Receiver Independent Exchange Format Version 3.05. International GNSS Service.
- Schaer S. Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System // Astronomical Institute, University of Berne: Berne, Switzerland, 1999.
- SINEX_BIAS — Solution (Software/technique) INdependent EXchange Format for GNSS Biases. Version 1.00. Stefan Schaer, swisstopo/AIUB.
- Wang N., Yuan Y., Li Z., Montenbruck O., Tan B. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations // J. Geodesy. 2016. Vol. 90, Issue 3. P. 209–228.
- Zhang Q., Zhao Q. Global ionosphere mapping and differential code bias estimation during low and high solar activity periods with GIMAS software // Remote Sens. 2018. Vol. 10. P. 705. doi: 10.3390/rs10050705.