

**О ПРОБЛЕМЕ КОМПЕНСАЦИИ ИОНОСФЕРНОЙ
ЗАДЕРЖКИ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В ЦЕЛЯХ
ПРОВЕДЕНИЯ КАЛИБРОВКИ ГНСС-ПРИЁМНИКОВ**

Е.А. Карауш

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
khanykova@vniiftri.ru*

Аннотация. Задержка навигационных сигналов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) в ионосферном слое Земли приводит к существенной погрешности в результатах координатно-временных определений. Для ряда задач в области метрологического обеспечения ГНСС (например, калибровки навигационной аппаратуры потребителя (НАП) по сигналам ГЛОНАСС на частотах L1, L2) ключевыми условиями являются оценка и компенсация ионосферной задержки с высокой точностью. В статье рассматривается проблема оценки задержки сигнала в ионосферном слое Земли. Выделяются и описываются особенности различных способов учёта или исключения ионосферной задержки из результатов псевдодальномерных измерений.

Ключевые слова: навигационные сигналы, калибровка, ГНСС-приёмники.

**ON THE PROBLEM OF COMPENSATION OF IONOSPHERIC
DELAY OF NAVIGATION SIGNALS FOR THE PURPOSE
OF CALIBRATION OF GNSS RECEIVERS**

E.A. Karaush

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
khanykova@vniiftri.ru*

Annotation. The delay of the navigation signals of the Global Navigation Satellite System (GNSS) in the ionospheric layer of the Earth leads to a significant uncertainty in the results of coordinate-time determinations. For a number of tasks in the field of metrological support of GNSS (for example, calibration of user navigation equipment (UNE) by GLONASS signals at L1, L2 frequencies), the key condition is the assessment and compensation of the ionospheric delay with high accuracy. The article deals with the problem of estimating the signal delay in the Earth's ionospheric layer. The features of various methods of accounting for or excluding the ionospheric delay from the results of pseudo-range measurements are highlighted and described.

Key words: navigation signals, calibration, GNSS receivers.

Введение

Принцип функционирования ГНСС основан на измерении времени распространения сигнала от антенны навигационного космического аппарата до антенны НАП. Однако на скорость распространения сигнала влияет множество факторов, к числу которых относится неоднородность ионосферы

Земли. Ионосферный слой — область атмосферы выше 50 км, содержащая электронно заряженные частицы [1] и характеризуемая полным электронным содержанием Total electron content (ТЕС). Плотность таких частиц неравномерно распределена на пути распространения навигационного сигнала и зависит от солнечного излучения в течение дня и ночи [2].

Навигационные космические аппараты (НКА) ГНСС передают радиосигналы в L-диапазоне (для системы ГЛОНАСС L1 = 1605,375...1598,0625 МГц, L2 = 1248,625...1242,9375 МГц, L3 = 1202,025 МГц [3, 4]), что позволяет им проходить ионосферу и избегать ослабления на пути распространения. Но навигационные сигналы чувствительны к структуре и неоднородности ионосферной плазмы. Поэтому для ГНСС требуется постоянный мониторинг ионосферы. Классическим подходом для исключения влияния ионосферы является применение линейной комбинации многочастотных наблюдений [5]. Однако такой подход не позволяет определять абсолютные значения задержек сигналов в НАП на частотах L1, L2. В случае невозможности применения такой комбинации способ компенсации ионосферной задержки является ключевым вопросом в решении — значение ионосферной задержки сигнала может достигать 30 м. Проблема также заключается в том, что сложно моделировать вариации и характеристики ионосферы, а также в результатах псевдодальномерных измерений присутствуют другие частотно-зависимые влияющие факторы.

Описание ионосферной задержки навигационного сигнала

Как уже упоминалось, ионосфера является дисперсионной средой, в которой задержка навигационного сигнала зависит от его частоты и линейно от плотности электронов на пути прохождения сигнала. Ионосферная задержка (в метрах) для кодовых P и фазовых Φ псевдодальномерных измерений выражается как

$$I_P = \frac{40,3}{f^2} \cdot \text{ТЕС}, \quad (1)$$

$$I_\Phi = \frac{40,3}{f^2} \cdot \text{ТЕС}, \quad (2)$$

где I_P , I_Φ — ионосферная задержка для кодовых P и фазовых Φ псевдодальномерных измерений, м; f — частота навигационного сигнала, Гц; ТЕС — полная электронная концентрация, электрон/м³ [5].

Для исключения ионосферной задержки из псевдодальномерных измерений необходимо знать с достаточной точностью параметр ТЕС, измеряющийся в единицах TECU, которые определяются как 1 TECU = 10¹⁶ электронов/м³ [5]. На основе соотношений (1) и (2) разработаны несколько способов учёта влияния ионосферы.

Для упрощения моделирования ионосферы рассматривают в виде тонкого слоя, окружающего Землю, с высотой 350–450 км, соответствующей высоте наивысшей концентрации электронов ТЕС в ионосфере. ТЕС моделируется как концентрация электронов в вертикальном направлении (VTEC), масштабируемом с помощью коэффициента наклона, чтобы учесть увеличение длины ионосферного пути на более низких углах места НКА. Ключевым условием при оценке ионосферной задержки сигналов ГНСС является качество используемой модели и функции отображения. Существуют несколько подходов описания ионосферной задержки сигнала и её оценки [6].

Функция отображения. Функция отображения используется для одночастотных псевдодалномерных измерений. Ионосферная задержка НКА может быть вычислена с использованием значения VTEC в месте размещения ГНСС-приёмника и функции отображения:

$$I_{\text{НКА}} = \frac{40,3}{f^2} \cdot \text{VTEC} \cdot m(e'), \quad (3)$$

где VTEC — концентрация электронов в вертикальном направлении, электрон/м²; $m(e') = \frac{1}{\sqrt{1 - \cos^2(e')}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{R+h} \cdot \cos(e)\right)^2}}$ — функции отображения,

зависящая от угла места e' на высоте точки прохождения сигнала ионосферы h . Угол e' в случае однослойной модели ионосферы выражается через радиус Земли R , высоту ионосферы h и угол места НКА e . Такое упрощение в части представления ионосферы в виде тонкой оболочки с высотой h вводится из-за недоступности информации о пространственной структуре ионосферы, что приводит к погрешности при оценке ионосферной задержки сигнала НКА.

Проводились исследования по совершенствованию описанной функции отображения [7–10]. Одним из вариантов является разделение ионосферы на разные сферические слои с помощью определённых функций отображения [7, 8]. Также применяются томографические методы для трёхмерной оценки ТЕС [9] и включение в функцию отображения горизонтальных градиентов ионизации [10]. Исследование [10] показало уменьшение погрешности, вызванной функцией отображения, на более чем 50 % как при высокой, так и при низкой солнечной активности.

Модели ионосферы Земли, используемые в ГНСС

Модели ионосферы, передаваемые в навигационном сообщении. Такие модели передаются в навигационном сообщении. Для GPS применяется модель Klobuchar [11], для Galileo — модель NeQuick [12], для BeiDou — модель Klobuchar-like [13].

Модель Klobuchar использует геодезические координаты антенны, время, угол и азимут НКА, 8 коэффициентов для описания ионосферы, которая представлена как двумерная модель тонкой оболочки (то есть VTEC сосредоточена на заданной высоте, преобразуется функцией отображения в зависимости от угла места НКА). Устраняет более 50 % ионосферной ошибки (преимущественно для средних широт). Модель учитывает периодические и амплитудные вариации ионосферы в суточном масштабе и отражает характерные вариации ионосферы. В Beidou используют усовершенствованную модель Klobuchar, адаптированную для китайского региона.

Модель NeQuick — трёхмерная и зависящая от времени модель электронной плотности ионосферы, основанная на эмпирическом климатологическом представлении ионосферы, которая предсказывает среднемесячную электронную плотность на основе аналитических профилей в зависимости от солнечной активности: число солнечных пятен или солнечный поток, месяц, географическая широта и долгота, высота и всемирное время (UT).

Однако такие модели не обеспечивают высокого уровня точности и надёжности решения, а также некорректно использовать их для отечественной системы ГЛОНАСС.

Глобальная ионосферная карта GIM. Глобальная ионосферная карта публикуется Международной службой ГНСС (International GNSS Service IGS) в формате IONEX. Содержит значения TECU в глобальной сетке и обновляется каждые 2 часа [14]. В настоящее время GIM от IGS представляет собой комбинированный продукт аналитических центров [15]. Номинальная точность GIM составляет 0,3–0,8 м в зенитном направлении, но понижается в районах с уменьшением количества участвующих станций [16].

Алгоритм обработки для восстановления TEC [17]:

1. Подгонка TEC в ночное время выполняется для получения эталонных дифференциальных кодовых смещений (Differential Code Biases DCB).
2. Применение модели Чарпана к данным TEC, слой максимальной электронной плотности и его высота оцениваются как поверхностные функции геомагнитной широты и местного времени. Высота слоя может быть только в диапазоне 350–450 км или 400–450 км.
3. Подгонка модели Чарпана к TEC для постоянной высоты.
4. Подгонка модели Чарпана к TEC, где высота 450 км и влияние зенитного угла Солнца не учитывается.

DCB орбитальных группировок ГНСС (GPS, ГЛОНАСС) и приёмников оцениваются одновременно с глобальным TEC.

Исходной информацией являются измерения сети станций IGS. Однако, как показано на рис. 1, по сравнению с Европой на территории России невысокая плотность станций, измерения с которых привлекаются для построения ионосферных карт. Это обстоятельство влияет на точность оцениваемых параметров. Таким образом, применение ионосферных карт в задаче удалённой калибровки приёмников по сигналам ГНСС не позволит обеспечить требуемую точность оценок задержек навигационных сигналов.

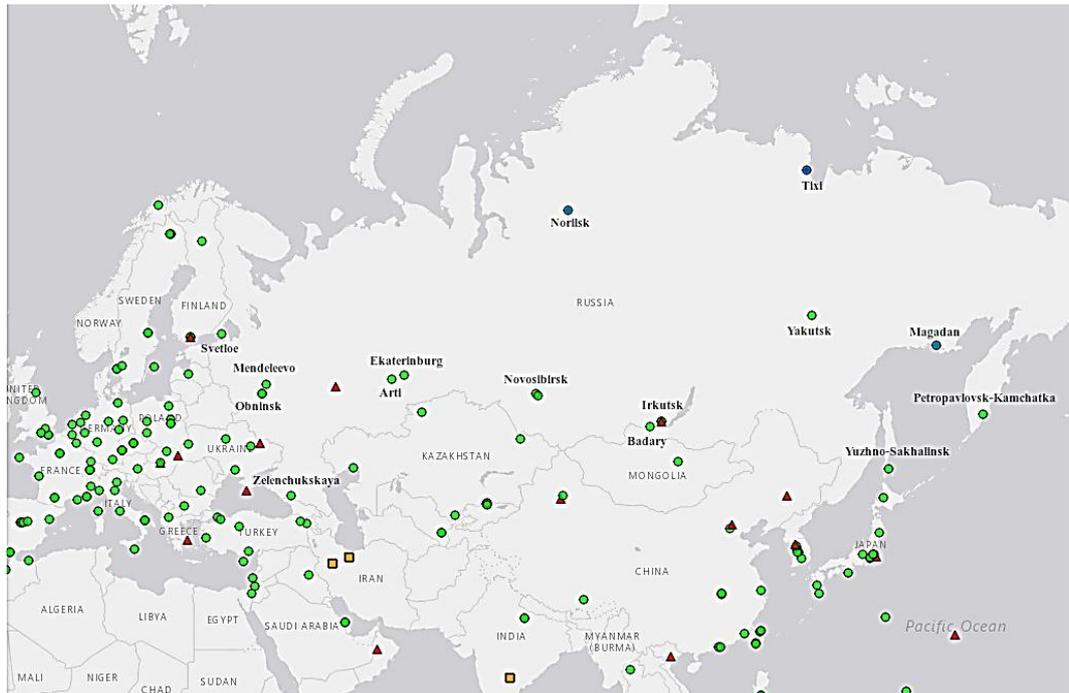


Рис. 1. Карта размещения станций IGS

Локальная ионосферная карта. Характеризует вертикальную ионосферную задержку в небольшой области с помощью двухчастотных данных ГНСС от местных опорных станций. Важным вопросом является выбор математического представления ионосферной задержки. Многие функции были изучены в данной задаче, включая полиномиальную функцию (оптимальна для небольших пространств в 20–80 км) [18], (скорректированную) сферическую гармоническую функцию низкого порядка и функцию сферической верхней гармоники [19]. Однако для оценки ионосферы необходимо использовать калиброванные ГНСС-приёмники.

Параметризованная модель ионосферы. В отличие от вышеупомянутых четырёх методов ионосферного моделирования, ионосферная задержка моделируется рядом неизвестных параметров и оценивается одновременно с позиционированием, например вертикальная задержка и две компоненты градиента [19], параметр изменения во времени для каждого спутника (GRAPHIC, групповая и фазовая ионосферная поправки) [20]. Однако предварительная ионосферная информация важна для этого способа. В противном случае длительное время сходимости станет неприемлемым для пользователей, работающих в режиме реального или близкого к реальному времени.

Результаты сравнения моделей ионосферы

Точность оценки ионосферной задержки является основным препятствием на пути к сантиметровой точности определения калибровочных поправок ГНСС-приёмника. В таблице приведены результаты сравнения описанных моделей: погрешность модели, необходимые исходные данные и эффективность применения для системы ГЛОНАСС.

Модели из навигационного сообщения позволяют компенсировать ионосферную задержку до 50 %, что не отвечает требованиям к точности в рамках поставленной задачи. Использование локальной модели затрудняется необходимостью разворачивания сети станций. Также необходимо калибровать приёмники сети станций с определённой периодичностью, что влечёт к финансовым и временным затратам. Без создания новых станций можно использовать данные глобальной ионосферной карты GIM, но следует учитывать формат представления значений VTEC (на сетке с шагом $2,5^\circ$ по долготе и 5° по широте и на суточном интервале времени с шагом в 2 часа), а также зависимость надёжности данных от местоположения ГНСС-приёмника.

Таблица
Сравнение моделей ионосферы Земли, применяемых в ГНСС

Модель	Погрешность модели	Исходные данные	Примечание
Модель из навигационного файла	до 50 % [11]	Псевдодальномерные измерения. Навигационные файлы GPS, Galileo, BeiDou с параметрами ионосферы	Не подходят для ГЛОНАСС
Глобальная модель GIM	2–8 TECU [15] ($\approx 0,31$ м для L1)	Результат комбинированного решения различных аналитических центров. Оценка TEC и DCB	Данные о TEC на территории РФ недостаточно надёжны
Локальная модель	0,3 м (при базовой линии 80 км) [16]	Псевдодальномерные измерения в диапазонах L1, L2	Необходима локальная сеть калиброванных станций
Параметризованная модель	до 0,5 м [20]	Псевдодальномерные измерения в диапазонах L1, L2. Предварительная информация о TEC (из файла IONEX)	Использование метода Precise Point Positioning (PPP) без формирования ионосферно-свободной комбинации

Использование параметризованной модели ионосферы является наиболее перспективным способом в решении задачи калибровки ГНСС-приёмников относительно опорного по сигналам отечественной системы ГЛОНАСС. Прежде всего, точность оценки TEC зависит от вида модели ионосферы, не требуется размещения сети калиброванных станций.

В ходе исследования был реализован алгоритм оценки VTEC с привлечением параметризованной и глобальной моделей. Расчёт был проведён для станций MDVJ (п. Менделеево, Московская обл., Россия), PTBV (Braunschweig, Germany) на суточном интервале (рис. 2). Псевдодальномерные измерения опубликованы в международном формате RINEX в открытом доступе. В пункте PTBV измерения проводились приёмником Septentrio PolaRX5TR, подключённым к внешнему источнику опорного частоты. В пункте MDVJ размещён приёмник Topcon NETG3. Также привлекались высокоточная эфемеридно-временная информация, параметры вращения Земли, данные для расчёта смещения и вариации фазовых центров антенн как НККА, так и ГНСС-приёмников. Результатом обработки псевдодальномерных измерений являются оценки VTEC для этих пунктов на суточном интервале (дата проведения измерений: 02.01.2021 г.) с шагом в 30 секунд.

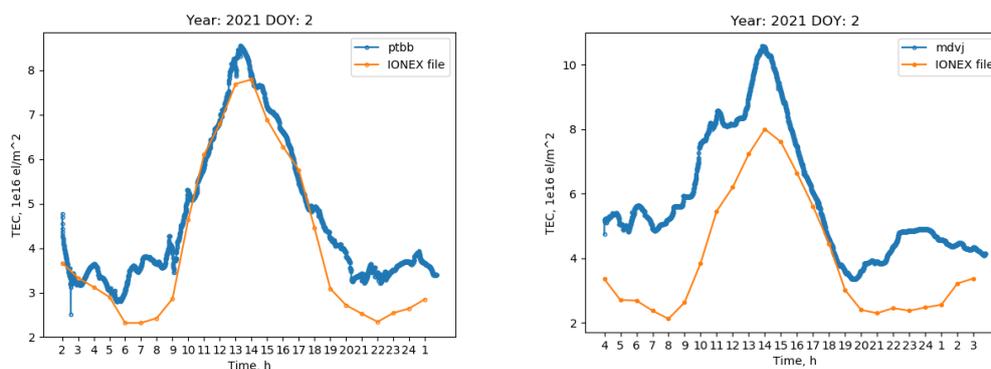


Рис. 2. Сравнение оценок VTEC и данных из IONEX файла для пунктов PTBV и MDVJ на 02.01.2021: DOY — номер дня в году; ptbb, mdvj — полученные оценки VTEC, TECU; IONEX file — данные VTEC из файла, опубликованного IGS, TECU; Time — локальное время, час

В результате сравнения полученных оценок VTEC и данных, публикуемых IGS, для пункта PTBV выявлена схожесть характера изменения ионосферы на суточном интервале времени. Расхождения значений VTEC не превышают 1 TECU. Однако для пункта MDVJ такое расхождение превышает 2 TECU. Причина в том, что GIM имеет гораздо меньшую точность, чем в Германии. Число европейских станций, участвующих в построении GIM, более 50, в то время как на территории России — менее 15 (рис. 1).

Стоит отметить, что представление о тонком слое ионосферы и функции отображения также ухудшает результаты оценки VTEC. Поэтому требуется продолжение исследований по выбору способа оценивания ионосферной задержки в направлении усложнения описания ионосферы.

Заключение

В данной работе рассмотрены различные способы оценки ионосферной задержки в одночастотном режиме — модели, передаваемые в составе навигационного сообщения, глобальная модель, локальная модель и параметрическая модели. Результат сравнения показал, что:

- модели из состава навигационного сообщения вносят большую погрешность в результаты измерений;
- глобальная ионосферная модель GIM не может обеспечить высокую точность и надёжность для невключённых в сеть станций IGS;
- для локальной модели требуется сеть станций на малых базовых линиях (с базовой линией до 100 км) с известными задержками в используемых ГНСС-приёмниках.

Использование параметризованной модели ионосферы является перспективным направлением. Для повышения точности оценок VTEC следует провести дополнительные исследования более сложных моделей ионосферы и функции отображения.

Список литературы

1. ГОСТ 25645.113-2019. Ионосфера Земли. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2019. — 19 с.
2. Klobuchar J.A. Ionospheric effects on GPS // GPS World. — 1991. — V. 2. — No. 4. — P. 48–51.
3. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2 (редакция 5.1). — М., 2008. — 74 с.
4. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. Навигационный радиосигнал открытого доступа с кодовым разделением в диапазоне L3 (редакция 1.0). — М., 2016. — 57 с.
5. IERS Conventions (2010) / Gérard Petit and Brian Luzum (eds.) // IERS Technical Note, 36. — Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. — 179 p.
6. Klobuchar J.A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 1987. — V. AES-23. — P. 325–331.
7. Sakai T., Yoshihara T., Saito S., Matsunaga K., Hoshino K., Walter T. Modeling Vertical Structure of Ionosphere for SBAS // Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2009). — Savannah, GA, September 2009. — P. 1257–1267.
8. Mannucci A.J., Iijima B., Sparks L., Pi X., Wilson B., Lindqwister B.U. Assessment of global TEC mapping using a three-dimensional electron density model // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 1999. — V. 61. — P. 1227–1236.

9. Hernandez-Pajares M., Juan J.M., Sanz J., Garcia-Fernandez M. Towards a more realistic ionospheric mapping function // Proc. XXVIII URSI Gen. Assembly. — Delhi (URSI, Ghent), 2005. — P. 1–4.
10. Hoque M.M., Jakowski N. Mitigation of Ionospheric Mapping Function Error // Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2013). — Nashville, TN, September 2013. — P. 1848–1855.
11. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems / Teunissen P.J.G., Montenbruck O. (Eds.) // Springer International Publishing. — 2017. — 1327 p.
12. European Union. European GNSS (Galileo) Open Service-Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Users. 1.2. — European commission, 2016. — 83 p.
13. BD-SIS-ICD BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document / Evaluation of COMPASS ionospheric model in GNSS positioning / Wu X. et al. // Adv. Space Res. 51(6). — China Satellite Navigation Office, Beijing, 2012. — P. 959–968.
14. Schaer S. et al. IONEX: the IONosphere map EXchange format. Version 1 // IGS AC Workshop. — Darmstadt, Germany, 1998.
15. Hernández-Pajares M. Summary and current status of IGS ionosphere WG activities a potential future product: global maps of effective ionospheric height // IGS technical workshop, 2006. — P. 12.
16. Orús R et al. Performance of different TEC models to provide GPS ionospheric corrections // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2006. — 64 (18). — P. 2055–2062.
17. Romero J.M. Dow, Zandbergen R., Feltens J., García C., Boomkam H. The ESA/ESOC IGS Analysis Centre Annual Report // IGS 2001/2002 Technical Reports. — P. 364.
18. Coco D.S. et al. Variability of GPS satellite differential group delay biases // IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems. — 1991. — V. 27 (6). — P. 931–938.
19. Liu J. et al. Spherical cap harmonic model for mapping and predicting regional TEC // GPS Solutions. — 2011. — V. 15 (2). — P. 109–119.
20. Chen K., Gao Y. Real-time precise point positioning using single frequency data // Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2005). — Long Beach, CA, September 2005. — P. 1514–1523.

Статья поступила в редакцию: 28.10.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 18.11.2021 г.

Статья принята в работу: 23.11.2021 г.