

Результаты экспериментальной оценки точности навигации одночастотной НАП при использовании модели ионосферы ГЛОНАСС, уточненной по двухчастотным измерениям для региональной сети НАП

© Ю. В. Чубаров

Филиал ПНБО АО «НПК «СПП», г. Королев, Россия

Реферат

Целью работы является экспериментальная отработка двух этапов методики определения ионосферных данных для оперативного режима позиционирования потребителей ГЛОНАСС, связанных с оценкой дифференциальных кодовых задержек и уточнением параметров локальной модели ионосферы. В рамках исследования решается задача повышения точности навигационных определений одночастотной НАП за счет использования уточненных локальных параметров модели ионосферы. Выполняется сравнительная оценка полученного решения относительно решения с применением модели ионосферы ГЛОНАСС, рекомендованной потребителям в интерфейсном контрольном документе ГЛОНАСС для сигналов открытого доступа с кодовым разделением (ИКД ГЛОНАСС) и модели ионосферы GPS Клубучара, определенной в официальной спецификации системы GPS.

Для построения локальной уточненной модели ионосферы в качестве исходной была выбрана модель ионосферы, представленная в ИКД ГЛОНАСС. Исходными данными служили двухчастотные кодовые и фазовые измерения региональной сети навигационной аппаратуры потребителя (НАП), цифровая информация навигационных сообщений, а также среднесуточные индексы солнечной и геомагнитной активности. Уточнение параметров модели ионосферы выполнялось путем сопоставления значения ионосферной задержки, рассчитанного с применением исходной модели ионосферы ГЛОНАСС и эталонного значения ионосферной задержки, определенного с использованием линейных комбинаций, сформированных по двухчастотным измерениям опорной НАП. Экспериментальная оценка точности позиционирования осуществлялась по значению среднеквадратической погрешности невязок координат, вычисленных по одночастотным измерениям в диапазоне L1 относительно известных координат станций региональной сети НАП.

Таким образом, были отработаны алгоритмы оценки дифференциальных кодовых задержек и уточнения параметров локальной модели ионосферы ГЛОНАСС. Показано, что применение локальной уточненной модели ионосферы ГЛОНАСС позволяет снизить среднеквадратическую погрешность невязок координат одночастотной НАП до 17 % по сравнению с использованием исходной модели ГЛОНАСС. Сравнительный анализ погрешности навигации одночастотной НАП по измерениям GPS при использовании модели ионосферы GPS Клубучара по отношению к уточненной модели ГЛОНАСС подтвердил преимущество уточненной модели ГЛОНАСС до 15 %. Сделан вывод о возможности практического применения разработанных алгоритмов при реализации методики определения ионосферных данных для оперативного режима позиционирования потребителей ГЛОНАСС.

Ключевые слова: модель ионосферы ГЛОНАСС, локальная модель ионосферы, полное электронное содержание (ПЭС), двухчастотные навигационные измерения, ионосферная задержка радиосигнала, точность навигации, одночастотное позиционирование.

Контакты для связи: Чубаров Юрий Витальевич (chubarov@spnav.ru).

Для цитирования: Чубаров Ю. В. Результаты экспериментальной оценки точности навигации одночастотной НАП при использовании модели ионосферы ГЛОНАСС, уточненной по двухчастотным измерениям для региональной сети НАП // Труды ИПА РАН. 2026. Вып. 76. С. 25–31.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.76.25-31>

Results of Experimental Assessment of Single-Frequency User Positioning Accuracy Using a GLONASS Ionospheric Model Refined by Dual-Frequency Measurements for a Regional Network of User Receivers

Yu. V. Chubarov

JC "RPC" PSI" branch "PNBO", Korolev, Russia

Abstract

The purpose of this paper is to experimentally validate two stages of the methodology for determining ionospheric data for the operational positioning mode of GLONASS users. These stages include the estimation of differential code delays and the refinement of the local ionospheric model parameters. The study focuses on improving the positioning accuracy of single-frequency user equipment by utilizing refined local ionospheric model parameters. Additionally, a com-

parative assessment of the obtained solutions is conducted against those based on the GLONASS ionospheric model recommended in the GLONASS Interface Control Document (GLONASS ICD) for open-access code-division signals, as well as the GPS Klobuchar ionospheric model specified in the official GPS system documentation.

To develop the refined local ionospheric model, the ionospheric model presented in the GLONASS ICD was selected as the baseline model. The input data comprised dual-frequency code and carrier-phase measurements from a regional network of user receivers, digital navigation message data, and daily mean solar and geomagnetic activity indices. The model parameters were refined by comparing the ionospheric delay calculated using the baseline GLONASS model with reference ionospheric delay values. These reference values were determined through linear combinations of dual-frequency measurements from a reference receiver. The experimental evaluation of positioning accuracy was carried out using the root-mean-square error of coordinate residuals derived from single-frequency L1 measurements relative to the regional network station coordinates of the user receivers.

In summary, the algorithms for estimating differential code delays and refining the local GLONASS ionospheric model's parameters were validated. Results show that employing the refined local GLONASS ionospheric model reduces the root-mean-square error of coordinate residuals for single-frequency user equipment by up to 17 % compared to using the baseline GLONASS model. Furthermore, a comparative analysis between navigation errors of single-frequency GPS users — using the GPS Klobuchar model versus the refined GLONASS model — confirmed an accuracy advantage of up to 15 % for the refined GLONASS model. It is concluded that the developed algorithms are practically applicable in implementing the methodology for determining ionospheric data for the operational positioning mode of GLONASS users.

Keywords: GLONASS ionosphere model, local ionosphere model, total electron content (TEC), dual-frequency navigation measurements, ionospheric signal delay, positioning accuracy, single-frequency positioning.

Contacts: Yuri V. Chubarov (chubarov@spnav.ru).

For citation: Chubarov Yu. V. Results of experimental assessment of single-frequency user positioning accuracy using a GLONASS ionospheric model refined by dual-frequency measurements for a regional network of user receivers // Transactions of IAA RAS. 2026. Vol. 76. P. 25–31.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.76.25-31>

Введение

В настоящее время активно развиваются системы высокоточного глобального и регионального навигационного обеспечения, ориентированные на оперативное позиционирование потребителей различного класса, включая одно- и двухчастотные приемники. Существенное влияние на точность навигационных определений в таких системах оказывает ионосферная задержка радиосигналов, особенно в одночастотном режиме. В этой связи актуальной является задача построения высокоточной глобальной модели ионосферы, адаптированной к условиям эксплуатации отечественной навигационной системы ГЛОНАСС и обеспечивающей повышение точности навигации в оперативном режиме.

Ранее в работе (Гулидов, 2025) была предложена комбинированная двухкомпонентная глобально-локальная модель ионосферы, основанная на разложении глобальной составляющей в виде полинома по сферическим гармоникам и использовании локальных корректирующих аддитивных сеточных поправок. Глобальный компонент описывает медленно изменяющийся фон ионосферы и может передаваться пользователю с установленной периодичностью, тогда как локальный компонент предназначен для учета быстрых региональных и локальных возмущений и передается с более высокой частотой. Предлагаемая модель ориентирована на применение в задачах высокоточного позиционирования в оперативном режиме. Для одночастотных потребителей ее использование обеспечивает повышение точности навигационных

определений за счет более адекватного учета текущего состояния ионосферы, а для двухчастотных НАП комбинированная модель может применяться в качестве источника априорной ионосферной информации при решении навигационной задачи в фильтре Калмана, где ионосферная составляющая является доминирующим источником систематических погрешностей. Это позволяет существенно сократить время сходимости решений типа PPP (PPP-RT, PPP-RTK, PPP-AR) (Zhang, 2022; Li, 2019), повысить устойчивость оценивания в начальные интервалы наблюдений, а также увеличить надежность навигационных решений при дефиците наблюдений и неблагоприятных условиях распространения радиосигналов.

В мировой практике реализованы оперативные сервисы глобального моделирования ионосферы, основанные на аппроксимации глобального распределения вертикального полного электронного содержания разложением по сферическим гармоникам и передаче пользователям сеточных карт вертикального полного электронного содержания, в частности сервис IGS RT-GIM (Liu, 2021), а также высокоточные сервисы PPP-RT, PPP-AR, реализованные Французским космическим агентством CNES (Loyer, 2012; Collins, 2014; Gazzino, 2023), и модели типа SHPTS Китайской академии наук (Li, 2015; ARTEMIS project). Однако в данных системах сеточные значения, как правило, являются формой представления единого глобального решения и не используются в виде самостоятельного аддитивного корректирующего слоя. Кроме того, для отечественных функциональных дополнений

ГЛОНАСС на текущий момент публично не задокументирована реализация комбинированной глобально-локальной модели ионосферы с передачей локальных сеточных поправок потребителям, работающим в оперативном режиме, что определяет актуальность рассматриваемого направления исследований.

Для определения параметров комбинированной глобально-локальной модели ионосферы была разработана методика, включающая: оценку дифференциальных кодовых задержек (ДКЗ, англ. *DCB*), уточнение параметров локальной модели ионосферы, определение коэффициентов разложения сферических гармоник глобального слоя и вычисление аддитивных ионосферных поправок в узлах регулярной географической сетки.

Настоящая статья посвящена отработке первого и второго этапов упомянутой выше методики, при этом основной упор сделан на исследование процедуры уточнения локальных параметров модели ионосферы на основе двухчастотных измерений для региональной сети НАП. В ходе исследования проведена экспериментальная оценка точности навигации одночастотной НАП при использовании уточненной модели относительно модели ионосферы, рекомендованной потребителям в интерфейсном контрольном документе ГЛОНАСС для сигналов открытого доступа с кодовым разделением (далее – ИКД ГЛОНАСС) ([PKC, 2021](#)) и модели ионосферы GPS Клобучара, определенной в официальной спецификации системы GPS ([IS-GPS-200](#)). Также сделан вывод о возможной применимости предлагаемого подхода в рамках дальнейшего формирования комбинированной глобально-локальной модели ионосферы и реализации методики определения ионосферных данных для оперативного режима позиционирования потребителей ГЛОНАСС.

Методическая схема оценки точности локальной модели ионосферы

Экспериментальная оценка точности локальной модели ионосферы выполнялась по методической схеме, включающей четыре последовательных шага:

- оценка ДКЗ и определение абсолютных значений полного электронного содержания (ПЭС, англ. *TEC*);

- уточнение локальных параметров модели ионосферы ГЛОНАСС;

- оценка точности навигации одночастотной НАП ГЛОНАСС при использовании исходной и уточненной моделей ионосферы;

- оценка точности навигации одночастотной НАП GPS с использованием уточненной модели ионосферы ГЛОНАСС и стандартной модели ионосферы GPS Клобучара.

Таким образом, предложенная схема позволила обеспечить как верификацию корректности уточнения локальных параметров модели по двухчастотным измерениям, так и количественную оценку влияния уточненной модели на точность навигационных определений одночастотных потребителей ГЛОНАСС и GPS.

Оценка дифференциальных кодовых задержек и определение абсолютных значений ПЭС

На этом шаге выполнялись оценка ДКЗ в приеме-передающих трактах НКА и НАП и определение абсолютных значений ПЭС по данным двухчастотных измерений. Для этого использовались кодовые измерения, сглаженные фазовыми, с последующим формированием геометрически свободных линейных комбинаций (ЛК), содержащих ионосферную задержку и аппаратные задержки:

$$\Delta P = \tilde{P}_2 - \tilde{P}_1,$$

где $\tilde{P}_1, \tilde{P}_2$ — сглаженные кодовые измерения псевдодальностей.

При оценке ДКЗ применялся подход, основанный на сопоставлении свободной от геометрии ЛК и ее расчетного аналога — сумме ионосферной задержки и совместной ДКЗ $DCB = (b_s + b_r)$ в каналах формирования навигационных сигналов НКА b_s и в приемных трактах НАП b_r :

$$\Delta P = 40.3 \cdot K_f \cdot F_1(z) E(\beta, s) + DCB,$$

$$E(\beta, s) = VTEC = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^{m_{\max}} E_{nm} (\beta - \bar{\beta})^n (s - \bar{s})^m,$$

где K_f — частотный коэффициент; $F_1(z)$ — модифицированная функция отображения; $E(\beta, s)$ — функция распределения значений ПЭС, представленная в виде двумерного разложения в ряд Тейлора по геоцентрической широте β и солнечно-фиксированной долготе подионосферной точки s ([Schaer, 1999](#)); E_{nm} — коэффициенты разложения в ряд Тейлора; $n_{\max}, m_{\max}$ — максимальные степени разложения; $\bar{\beta}, \bar{s}$ — координаты начала разложения.

Для нахождения неизвестных параметров составлялась и решалась система уравнений с применением метода наименьших квадратов (МНК). Технология оценки ДКЗ и восстановления абсолютных значений ПЭС была ранее отработана на стенде главного конструктора и в настоящее время успешно применяется в практических задачах обработки навигационных измерений ([Гулидов, 2018](#)). В рамках настоящей работы данный этап методики служил источником эталонных значений ионосферной задержки $I_{\text{изм}} = \Delta P - DCB$, используе-

мых на последующем этапе уточнения локальных параметров модели ионосферы ГЛОНАСС.

Уточнение локальных параметров модели ионосферы ГЛОНАСС

Для уточнения в качестве исходной использовалась модель ионосферы, рекомендованная потребителям в ИКД ГЛОНАСС. Уточнение локальных параметров выполнялось по данным двухчастотных измерений, полученных по региональной сети НАП. В качестве уточняемых параметров рассматривались абсолютные значения индексов солнечной активности $F_{10.7}$ и геомагнитной возмущенности Ap в модели ионосферы из ИКД ГЛОНАСС.

После оценки и исключения ДКЗ полученные значения ионосферной задержки $I_{изм}$ принимались за эталонные и использовались для составления системы разностных уравнений вида:

$$\Delta I^{(n)} = I_{\text{мод}}^{(n)} - I_{\text{изм}}^{(n)}$$

где $I_{\text{изм}}^{(n)}$ — эталонное значение ионосферной задержки на n -м интервале наблюдений; $I_{\text{мод}}^{(n)}$ — соответствующее значение, вычисленное по модели ионосферы ГЛОНАСС с актуальными значениями индексов солнечной и геомагнитной активности.

Поскольку параметры $F_{10.7}$ и Ap входят в модель нелинейно, их оценивание выполнялось в рамках нелинейной задачи МНК в регуляризированной постановке, что обеспечивало устойчивость решения и сходимость итерационного процесса при возможной плохой обусловленности задачи, по следующей итерационной схеме:

$$(J^T J + \lambda I) \Delta \mathbf{p}_k = -J^T \mathbf{r}_k, \quad \mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{p}_k + \Delta \mathbf{p}_k,$$

где J — матрица Якоби модели по параметрам $\mathbf{p}$; λ — коэффициент демпфирования (регуляризации), адаптивно изменяемый в процессе итераций для обеспечения сходимости; I — единичная матрица размерности $(J^T J)$; $\mathbf{p} = (F_{10.7}, Ap)^T$ — вектор оцениваемых параметров; $\mathbf{r}_k$ — вектор невязок между измеренными и модельными значениями ионосферной задержки на k -й итерации.

Итерационный процесс завершался при выполнении условия малости приращений оцениваемых параметров или при достижении заданного максимального числа итераций. В результате на каждом интервале оценивались абсолютные значения параметров $F_{10.7}$ и Ap , обеспечивающие наилучшее согласование модели с измеренными значениями ионосферной задержки.

Исходные данные и организация эксперимента

Для проведения эксперимента в 2025 г. было выбрано двое суток (9 и 17 марта), характеризующихся выраженными вариациями индексов солнечной активности и геомагнитной возмущенности. Значения индексов $F_{10.7}$ и Ap на указанных сутках приведены в табл. 1.

Таблица 1
Значения индексов на сутках для оценивания

	Дата	$F_{10.7}$	Ap
1	09.03.2025	148	35
2	17.03.2025	204	16

Для уточнения локальных параметров модели использовались измерения опорной калиброванной станции с международным кодом MYT2 региональной европейской сети НАП. Контроль корректности уточнения осуществлялся по данным трех станций, расположенных в том же локальном районе: ZIM2, ONSA и SVTL. Оценка ДКЗ и восстановление абсолютных значений ПЭС проводилась отдельно по каждой из перечисленных НАП. Такое построение эксперимента позволило независимо проверить переносимость уточненных параметров модели на соседние пункты наблюдений (рис. 1а).

Уточнение параметров выполнялось на часовых интервалах по измерениям всех видимых НКА ГЛОНАСС, для каждого интервала по данным опорной станции формировалась своя система уравнений, по которой оценивались значения $F_{10.7}$ и Ap . На рис. 1б синим цветом показаны эталонные

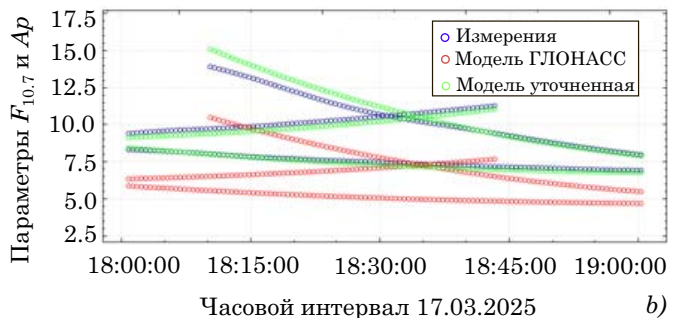


Рис. 1. а) расположение опорной станции региональной сети НАП и станций для оценивания в локальном районе; б) результат оценивания параметров $F_{10.7}$ и Ap на часовом интервале

значения ионосферной задержки, восстановленные по линейным комбинациям двухчастотных измерений, красным — расчетные значения по исходной модели ГЛОНАСС, зеленым — значения, полученные по уточненной модели. Представленные зависимости наглядно демонстрируют, что уточненная модель обеспечивает существенно лучшее согласование с измеренными значениями ионосферной задержки по сравнению с исходной моделью.

Полученные при уточнении параметры $F_{10.7}$ и Ap затем использовались для расчета ионосферных поправок как для опорной станции, так и для контрольных станций.

Результаты оценки точности навигации одночастотной НАП по измерениям ГЛОНАСС при использовании уточненной модели ионосферы ГЛОНАСС

Оценка эффективности уточнения локальных параметров модели ионосферы ГЛОНАСС выполнялась по результатам решения навигационной задачи для одночастотной НАП по кодовым измерениям сигнала стандартной точности ГЛОНАСС в диапазоне L1. В качестве оцениваемой характеристики использовалась среднеквадратическая погрешность (СКП) невязок координат, определенных относительно известных координат НАП.

Для каждой из рассматриваемых станций проводилось классическое решение навигационной задачи с уточнением координат и учетом влажной составляющей тропосферной задержки навигационного сигнала в двух вариантах учета ионосферной задержки:

— с использованием исходной модели ионосферы из ИКД ГЛОНАСС с актуальными среднесуточными значениями $F_{10.7}$ и Ap ;

— с использованием уточненной модели ионосферы, в которой применялись абсолютные значения $F_{10.7}$ и Ap , полученные по результатам оценки по двухчастотным измерениям на предыдущем шаге.

Экспериментальные расчеты выполнялись на двух сутках (9 и 17 марта) 2025 г., характеризующихся существенными изменениями уровня солнечной и геомагнитной активности. Навигационные решения формировались независимо для всех четырех станций региональной сети.

Результаты оценки, представленные в табл. 2, показывают, что применение уточненной локальной модели ионосферы обеспечивает устойчивое улучшение точности определения координат по сравнению с исходной моделью ГЛОНАСС. В зависимости от условий ионосферной обстановки и положения станции повышение точности составило 18.0–19.0 % для опорной и 10.2–16.9 % для контрольных станций.

Наибольший эффект уточнения наблюдался в периоды повышенной солнечной и геомагнитной активности, что подтверждает адекватность выбранного подхода к учету текущих ионосферных возмущений за счет адаптации параметров модели по оперативным двухчастотным измерениям. При этом для всех контрольных станций сохранялся устойчивый характер повышения точности, что свидетельствует о переносимости полученных локальных параметров модели в пределах рассматриваемого локального района.

Полученные результаты показывают, что уточнение локальных параметров модели ионосферы по данным одной опорной станции позволяет существенно повысить точность навигационных определений одночастотных потребителей ГЛОНАСС, находящихся в локальном районе.

Таблица 2

Результаты оценки точности определения координат одночастотной НАП по измерениям ГЛОНАСС при использовании уточненной модели ионосферы ГЛОНАСС

Значения СКП для опорной станции, по которой уточнялись параметры модели ионосферы						
Международный код	09.03.2025			17.03.2025		
	До, м	После, м	Δ , %	До, м	После, м	Δ , %
MYT2	3.94	3.19	19.0	3.77	3.08	18.03
Значения СКП для станций, по которым контролировались уточненные параметры модели ионосферы						
ZIM2	2.84	2.55	10.2	2.96	2.61	11.8
ONSA	2.98	2.67	10.4	3.11	2.69	13.5
SVTL	2.77	2.34	15.5	2.90	2.41	16.9

Таблица 3

Результаты оценки точности определения координат одночастотной НАП по измерениям GPS при использовании модели GPS и уточненной модели ГЛОНАСС

Значения СКП для опорной станции, по которой уточнялись параметры модели ионосферы						
Международный код	09.03.2025			17.03.2025		
	GPS (Клобучар), м	ГЛОНАСС уточненная, м	Δ , %	GPS (Клобучар), м	ГЛОНАСС уточненная, м	Δ , %
MYT2	3.94	3.19	19.0	3.77	3.08	18.03
Значения СКП для станций, по которым контролировались уточненные параметры модели ионосферы						
ZIM2	4.35	3.98	8.5	3.99	3.68	7.8
ONSA	4.64	4.09	11.9	4.29	3.85	10.2
SVTL	3.87	3.31	14.5	3.71	3.20	13.7

Результаты оценки точности навигации одночастотной НАП по измерениям GPS при использовании модели GPS и уточненной модели ГЛОНАСС

Для дополнительной верификации полученных результатов была выполнена оценка точности навигации одночастотной НАП GPS при использовании уточненной модели ионосферы ГЛОНАСС в сравнении со стандартной моделью ионосферы GPS Клобучара. Навигационная задача решалась по кодовым измерениям сигнала стандартной точности GPS в диапазоне L1 с учетом влажной составляющей тропосферной задержки навигационного сигнала для тех же станций региональной сети НАП и тех же временных интервалов, что и в эксперименте с одночастотным потребителем ГЛОНАСС.

Расчеты проводились для двух суток (9 и 17 марта) 2025 г., характеризующихся возмущенной ионосферной обстановкой. Для каждого пункта наблюдений навигационные решения формировались в двух вариантах: с использованием модели GPS и с использованием уточненной локальной модели ионосферы ГЛОНАСС. В качестве показателя точности, аналогично предыдущему разделу, использовалась СКП невязок координат относительно известных координат станций.

Анализ экспериментальных данных, представленных в табл. 3, показал, что применение уточненной модели ионосферы ГЛОНАСС в задачах навигации одночастотной НАП GPS также обеспечивает устойчивое повышение точности в сравнении со стандартной моделью GPS. В зависимости от контролируемой станции региональной сети НАП и уровня ионосферных возмущений повышение точности навигационных определений составило 7.8–14.5 %.

Следует отметить, что на рассмотренных интервалах времени модель GPS Клобучара, будучи глобальной однослойной эмпирической моделью

с ограниченным числом передаваемых параметров, не обеспечивает достаточной адаптации к локальным ионосферным возмущениям. В то же время уточненная локальная модель ионосферы ГЛОНАСС, параметры которой определялись по двухчастотным измерениям, более адекватно отражала текущее состояние ионосферы в рассматриваемом локальном районе, что и обеспечило дополнительный прирост точности позиционирования.

Полученные результаты подтверждают универсальность предлагаемого подхода к уточнению локальных параметров модели ионосферы ГЛОНАСС и возможность его применения не только для задач навигации потребителей ГЛОНАСС, но и для одночастотных потребителей других глобальных навигационных спутниковых систем.

Заключение

В работе представлен обзор первого и второго этапов методики определения ионосферных данных для оперативного режима позиционирования потребителей ГЛОНАСС: этапа оценки дифференциальных кодовых задержек и этапа уточнения параметров локальной модели ионосферы на основе двухчастотных измерений региональной сети НАП. Показано, что уточнение абсолютных значений индексов солнечной активности $F_{10.7}$ и геомагнитной возмущенности Ap с использованием свободных от геометрии линейных комбинаций, сформированных по двухчастотным измерениям опорной НАП, позволяет значительно повысить согласование расчетных значений ионосферной задержки с измеренными значениями.

По результатам экспериментальной оценки точности определения координат одночастотной НАП по измерениям ГЛОНАСС на выбранных временных интервалах установлено, что использование уточненной локальной модели ионосферы ГЛОНАСС обеспечивает снижение СКП невязок координат относительно известных координат

НАП на 10.2–16.9 % для региональной сети НАП по сравнению с моделью ионосферы ГЛОНАСС до уточнения. Аналогичный эффект подтвержден при сравнении с моделью ионосферы GPS Клубучара для одночастотной НАП по измерениям GPS, уточненная модель ГЛОНАСС показала улучшение на 7.8–14.5 %.

Полученные результаты подтверждают работоспособность и практическую эффективность предложенных алгоритмов уточнения параметров локальной модели ионосферы и создают основу для последующей реализации полного цикла формирования комбинированной глобально-локальной модели ионосферы с аддитивными сеточными поправками. В дальнейшем предполагается применение разработанного подхода для формирования априорных ионосферных данных в задачах высокоточного позиционирования одночастотных и двухчастотных НАП ГЛОНАСС, работающих в оперативном режиме.

Литература

- Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Общее описание системы с кодовым разделением сигналов (редакция 2.0). М.: РКС, 2021.
- Гулидов Д. В., Чубаров Ю. В. Методика определения ионосферных данных для оперативного режима позиционирования потребителей ГЛОНАСС // Информационно-измерительные и управляющие системы (в печати).
- Гулидов Д. В. Методика оценки дифференциальных кодовых задержек навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС в каналах формирования навигационных сигналов с частотным разделением // «Информационно-измерительные и управляющие системы» М.: Радиотехника. 2018. № 2. С. 18–24.
- ARTEMIS Project Summary. Real-time GNSS ionospheric products and application overview. Remote Sensing. (Описание практики SHPTS).
- Collins P., Bisnath S., Lahaye F., Héroux P. Undifferenced GPS ambiguity resolution using the decoupled clock model and ambiguity datum fixing // Navigation – Journal of The Institute of Navigation. 2014. Vol. 57(2). P. 123–135. doi: 10.1002/j.2161-4296.2010.tb01772.x.
- Gazzino C., Blot A., Bernadotte E., et al. The CNES solutions for improving the positioning accuracy with post-processed phase biases, a snapshot mode, and high-frequency Doppler measurements embedded in recent advances of the PPP-WIZARD demonstrator // Remote Sensing. 2023. Vol. 15, no. 17, 4231. doi:10.3390/rs15174231.
- IS-GPS-200. Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces. Interface Specification. Section 20.3.3.5.2.5 Ionospheric Model. El Segundo, CA: Global Positioning Systems Directorate, U.S. Space Force, 2022. 425 p.
- Li Z., Wang N., Wang L., et al. Regional ionospheric TEC modeling based on a two-layer spherical harmonic approximation for real-time single-frequency PPP // Journal of Geodesy. 2019. Vol. 93. P. 1659–1671. doi: 10.1007/s00190-019-01275-5.
- Li Z., Yuan Y., Wang N., et al. SHPTS: towards a new method for generating precise global ionospheric TEC map based on spherical harmonic and generalized trigonometric series functions // Journal of Geodesy. 2015. Vol. 89, no. 4. P. 331–345. doi: 10.1007/s00190-014-0778-9.
- Liu Q., Hernández-Pajares M., Yang H., et al. The co-operative IGS RT-GIMs: a reliable estimation of the global ionospheric electron content distribution in real time // Earth System Science Data. 2021. Vol. 13. P. 4567–4582.
- Loyer S., Perosanz F., Mercier F., et al. Zero-difference GPS ambiguity resolution at CNES: precise orbit determination and real-time orbit and clock products // Journal of Geodesy. 2012. Vol. 86. P. 991–1003. doi: 10.1007/s00190-012-0559-2.
- Schaer S. Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the global positioning system. Ph.D. dissertation. Bern. Astronomical Institute of the University of Bern. 1999. 208 p.
- Zhang X., Ren X., Chen J., et al. Investigating GNSS PPP-RTK with external ionospheric constraints // Satellite Navigation. 2022. Vol. 3, article number 6. doi:10.1186/s43020-022-00067-1.