

УДК 521.92

## МЕТОД РАСЧЁТА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БАЗОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ УСЛУГИ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

В.О. Жилинский, А.А. Фролов

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,  
zhilinskiy@vniiftri.ru,  
frolov\_aa@vniiftri.ru

*Аннотация.* В работе рассматриваются методы расчета характеристик базовой навигационной услуги системы ГЛОНАСС. Предложена методика оценки характеристик базовой навигационной услуги ГЛОНАСС (в части определения местоположения) около поверхности Земли.

*Ключевые слова:* система ГЛОНАСС, базовая навигационная услуга, эксплуатационные характеристики, метод расчёта.

## METHOD OF CALCULATION THE GLONASS STANDARD POSITIONING SERVICE PERFORMANCE

V.O. Zhilinskiy, A.A. Frolov

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,  
zhilinskiy@vniiftri.ru,  
frolov\_aa@vniiftri.ru

*Annotation.* The paper considers two methods for calculating the performance of the GLONASS standard positioning service. A new method for calculation the GLONASS positioning performance was proposed and implemented.

*Key words:* GLONASS system, basic navigation service, operational characteristics, method of calculation.

В последние годы глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) стали основой систем координатно-временного и навигационного обеспечения развитых стран, существенным элементом государственных и частных секторов мировой экономики. Наличие в мире нескольких одновременно функционирующих ГНСС вызывает необходимость координации программ их развития между странами-владельцами таких систем, а также международными организациями, непосредственно связанными с их развитием и использованием. Важнейшим направлением координации программ развития и использования имеющихся в настоящее время ГНСС является разработка внутренних и международных документов, устанавливающих единые показатели эффективности функционирования ГНСС и методы подтверждения соответствия этих показателей установленным (заявленным страной-владельцем ГНСС) значениям.

В 2019 г. в РФ был утверждён «Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса (СТЭХОС)» системы ГЛОНАСС [1], который устанавливает значения эксплуатационных характеристик канала стандартной точности ГЛОНАСС, создаваемого совокупностью навигационных сигналов с открытым доступом и частотным разделением, излучаемых в диапазонах L1 и/или L2, при отсутствии погрешностей навигационной аппаратуры потребителя (НАП) и погрешностей за счёт условий распространения навигационных сигналов. Документ также содержит методики оценки этих характеристик.

В базовую услугу ГЛОНАСС входят характеристики определения координат местоположения и времени канала стандартной точности ГЛОНАСС:

- глобальная средняя погрешность ( $p = 0,95$ ) местоопределения (Global Average Positioning Error) — не более 5 м в плане и 9 м по высоте;
- погрешность ( $p = 0,95$ ) местоопределения в худшей точке (Worst Site Positioning error) — не более 12 м в плане и 25 м по высоте;
- погрешность ( $p = 0,95$ ) передачи времени UTC(SU) (Global Average Time transfer error) — не более 40 нс.

Далее рассматриваются только методики оценки характеристик определения местоположения.

Расчёт указанных характеристик в СТЭХОС производится по следующей методике [2]:

1. Определяются разности апостериорных (final) и штатных (broadcast) эфемерид навигационных космических аппаратов (НКА) ГНСС ГЛОНАСС по радиусу, по бинормали, по нормали к плоскости движения каждого НКА.
2. Определяются значения погрешностей псевдодалности (URE) в каждой выбранной точке зоны действия орбитальной группировки на поверхности Земли (с постоянным шагом по долготе ( $1^\circ$ ) и переменным шагом по широте для обеспечения равенства площадей фигур, образованных выбранными точками).
3. Определяется вертикальная ( $VPE_{day}(\varphi, \lambda)$ ) и горизонтальная ( $HPE_{day}(\varphi, \lambda)$ ) составляющие погрешности местоопределения (в результате решения параметрической навигационной задачи для каждой выбранной точки на поверхности Земли в каждый момент времени).
4. Определяется глобальная средняя погрешность ( $p = 0,95$ ) местоопределения в плане ( $HPE_{Global}$ ) и по высоте ( $VPE_{Global}$ ):

$$HPE_{Global} = \sqrt{\frac{\sum_{\varphi, \lambda} HPE_{day}^2(\varphi, \lambda)}{N_{sites}}}, \quad VPE_{Global} = \sqrt{\frac{\sum_{\varphi, \lambda} VPE_{day}^2(\varphi, \lambda)}{N_{sites}}},$$

где  $\varphi$  — широта;  $\lambda$  — долгота;  $N_{sites}$  — количество точек поверхности.

5. Определяется погрешность ( $p = 0,95$ ) местоопределения в худшей точке в плане ( $HPE_{WorstSite}$ ) и по высоте ( $VPE_{WorstSite}$ ):

$$HPE_{WorstSite} = \max_{\varphi, \lambda} (HPE_{day}(\varphi, \lambda));$$

$$VPE_{WorstSite} = \max_{\varphi, \lambda} (VPE_{day}(\varphi, \lambda)).$$

Рассмотренная методика оценки погрешностей характеристик базовой услуги основана на обработке эфемерид НКА ГЛОНАСС, то есть за пределами зоны действия ГНСС. Таким образом, возникает несоответствие между зоной действия любой ГНСС (наземная часть и околоземное пространство от поверхности Земли до фиксированного значения высоты) и областью пространства, в которой проводится расчёт оценок нормированных точностных характеристик системы (через погрешности апостериорных эфемерид навигационных космических аппаратов).

Для устранения указанного несоответствия необходимо проводить оценку характеристик базовой навигационной услуги около поверхности Земли в зоне действия ГНСС. На сегодняшний день в рамках Международного комитета по ГНСС под эгидой ООН ведётся рассмотрение вопроса об уточнении порядка оценки характеристик ГНСС: переход к оценке на потребительском уровне. Представители таких стран, как США, Китай, Япония, Австралия, Индия, а также стран ЕС в целом поддерживают данный подход как основу для перспективных методов оценки характеристик ГНСС.

Для оценки характеристик базовой навигационной услуги ГЛОНАСС около поверхности Земли был разработан метод с использованием прецизионной калиброванной НАП, подключённой к сигналу опорной частоты 10 МГц водородного стандарта частоты и времени. Для измерения текущих навигационных параметров антенный модуль размещается на геодезическом пункте с известными координатами, а для учёта задержки радиосигнала в атмосфере производятся измерения метеопараметров в зоне размещения антенного модуля. Схема измерений представлена на рис.



Рис. Схема измерений при оценке эксплуатационных характеристик базовой навигационной услуги системы ГЛОНАСС

Координаты местоположения, используемые для получения количественных оценок характеристик базовой навигационной услуги, рассчитываются на основе псевдодальномерных измерений, полученных с использованием прецизионной навигационной аппаратуры в формате RINEX [3]. Уравнение псевдодальности может быть записано в следующем виде:

$$R_i = \rho_i + c(\delta t^{\text{П}} - \delta t_i^{\text{С}}) + T_i + I_i + M_i + \varepsilon,$$

где  $i = 0, \dots, K$  — номер НКА;  $\rho_i$  — геометрическая дальность до НКА;  $c$  — скорость света, м/с;  $\delta t_i^{\text{С}}$  — отклонение шкалы времени НКА относительно шкалы времени ГНСС, с;  $\delta t^{\text{П}}$  — отклонение шкалы времени НАП относительно шкалы времени ГНСС, с;  $T_i$  — тропосферная поправка, м;  $I_i$  — ионосферная поправка, м;  $\varepsilon$  — погрешность измерений, м.

Оценка глобальной средней погрешности местоопределения и погрешности местоопределения в худшей точке канала стандартной точности системы ГЛОНАСС выполняется по следующей методике:

1. На основе одномоментных измерений псевдодальности итерационным алгоритмом (порог сходимости итерационного алгоритма  $\leq 0,01$  м) для  $K$  видимых НКА производится расчёт координат местоположения с интервалом 30 с.
2. Рассчитываются разности (широта ( $\Delta B_N(t)$ ), долгота ( $\Delta L_N(t)$ ) и высота ( $\Delta H_N(t)$ )) между рассчитанными с использованием текущих навигационных параметров канала стандартной точности системы ГЛОНАСС значениями координат местоположения и действительными значениями для каждой НАП, где  $N$  — количество НАП, информация с которых используется в расчётах.
3. Определяются значения  $\Delta B_{N_{0,95\%}}(t)$ ,  $\Delta L_{N_{0,95\%}}(t)$ ,  $\Delta H_{N_{0,95\%}}(t)$ , соответствующие 95%-му уровню распределения суточных значений координат местоположения на заданном интервале, и определяются значения  $\Delta B_{N_{0,95\%}}$ ,  $\Delta L_{N_{0,95\%}}$ ,  $\Delta H_{N_{0,95\%}}$  на заданном интервале для каждой НАП:

– для широты:

$$\Delta B_{N_{0,95\%}} = \sqrt{\frac{\sum_1^k (\Delta B_{N_{0,95\%}}(t) \text{ (м)})^2}{k}},$$

– для долготы:

$$\Delta L_{N_{0,95\%}} = \sqrt{\frac{\sum_1^k (\Delta L_{N_{0,95\%}}(t) \text{ (м)})^2}{k}},$$

– для высоты:

$$\Delta H_{N_{0,95\%}} = \sqrt{\frac{\sum_1^k (\Delta H_{N_{0,95\%}}(t) \text{ (м)})^2}{k}},$$

где  $k$  — количество значений координаты местоположения.

4. Определяется погрешность определения координат местоположения в плане  $\Delta\Pi_{N_{0,95\%}}$  на заданном интервале для каждой НАП:

$$\Delta\Pi_{N_{0,95\%}} = \sqrt{(\Delta B_{N_{0,95\%}})^2 + (\Delta L_{N_{0,95\%}})^2}.$$

5. Определяется глобальная средняя погрешность ( $p = 95\%$ ) местоопределения канала стандартной точности системы ГЛОНАСС (в плане и по высоте):

$$\Delta\Pi = \sqrt{\frac{\sum_1^N (\Delta\Pi_{N_{0,95\%}})^2}{N}}; \quad \Delta H = \sqrt{\frac{\sum_1^N (\Delta H_{N_{0,95\%}})^2}{N}}.$$

6. Определяется погрешность ( $p = 0,95$ ) местоопределения в худшей точке в плане ( $\Delta\Pi_{WorstSite}$ ) и по высоте ( $\Delta H_{WorstSite}$ ):

$$\Delta\Pi_{WorstSite} = \max(\Delta\Pi_{N_{0,95\%}}); \quad \Delta H_{WorstSite} = \max(\Delta H_{N_{0,95\%}}).$$

Представленный метод обеспечивает [4] пределы погрешности измерений координат местоположения  $\pm 2,0$  м (при геометрическом факторе ухудшения точности PDOP не более 1,85).

Для обработки измерений текущих навигационных параметров и определения координат местоположения использовался программный модуль моделирования решения навигационной задачи потребителем ГНСС [5].

Сравнительные расчёты по указанным методикам проводились на основе измерительной информации, полученной в марте 2021 года. При расчёте оценок погрешностей координат местоположения, осуществляемого согласно методике СТЭХОС, применялись:

- высокоточная апостериорная эфемеридно-временная информация, предоставляемая Информационно-аналитическим центром координатно-временного и навигационного обеспечения [6];
- штатная эфемеридная информация, передаваемая в составе навигационных сообщений НКА ГЛОНАСС.

Для расчёта оценок погрешностей координат местоположения по разработанной методике использовались:

- измерения текущих навигационных параметров в диапазонах L1 и L2 (с темпом записи 30 с) с прецизионной калиброванной НАП, размещённой на территории института в р.п. Менделеево и в г. Хабаровск;
- маска угла возвышения НКА  $> 10^\circ$ ;
- расчёт ионосферной поправки [7];
- расчёт тропосферной поправки (модель MOPS [8]).

Результаты расчёта погрешностей определения координат в плане и по высоте приведены в таблице.

Таблица

Характеристика	Метод СТЭХОС	Предложенный метод
Глобальная средняя погрешность ( $p = 0,95$ ) местоопределения в плане, м	1,7	4,2
Глобальная средняя погрешность ( $p = 0,95$ ) местоопределения по высоте, м	2,5	6,2
Погрешность ( $p = 0,95$ ) местоопределения в худшей точке в плане, м	2,6	5,2
Погрешность ( $p = 0,95$ ) местоопределения в худшей точке по высоте, м	4,0	7,5

В рамках проведённых работ:

- предложен метод расчёта эксплуатационных характеристик базовой навигационной услуги системы ГЛОНАСС;
- разработан программный модуль, который позволяет производить оценку эксплуатационных характеристик базовой навигационной услуги ГЛОНАСС в соответствии с предложенной методикой и методикой, установленной СТЭХОС;
- получен результат расчёта оценок эксплуатационных характеристик по обоим методикам.

Расчёт эксплуатационных характеристик базовой навигационной услуги ГЛОНАСС с помощью предложенного метода имеет большую погрешность, но позволяет перейти к оценкам характеристик на потребительском уровне (у поверхности Земли до фиксированного значения высоты).

### Список литературы

1. ГЛОНАСС. Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса (СТЭХОС). Редакция 2.2. — Королёв: ИАЦ КВНО ФГУП ЦНИИмаш, 2019.
2. Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса (СТЭХОС). Приложение А. Методики расчёта эксплуатационных характеристик. Редакция 2.2. — Королёв: ИАЦ КВНО ФГУП ЦНИИмаш, 2019.
3. RINEX. The Receiver Independent Exchange Format. — URL: <ftp://igs.org/pub/data/format/rinex303.pdf> (дата обращения: 20.03.2021).
4. Свидетельство об аттестации методики (метода) измерений № 815-РА. RU.311243-2021. — Разраб.: ФГУП «ВНИИФТРИ». — 15.07.2021.

5. Zhilinskiy V., Gagarina L., Ishkova T., Petrov E., Petrova A. Software package for solving navigation problem using systematic instrumental error correction // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. — 2019. — P. 1871–1876.
6. Высокоточная эфемеридно-временная информация для ГЛОНАСС и GPS. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения. — URL: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/> (дата обращения: 03.03.2021).
7. Патент RU 2208809, МПК G01S 5/02, G01S 1/32, H04B 7/185. Способ одночастотного определения задержки сигналов навигационной спутниковой системы в ионосфере: № 2002104727/09: заявл. 21.02.2002.: опубл. 20.07.2003 / Казанцев М.Ю., Кокорин В.И., Фатеев Ю.Л.; заявитель ГОУ ВПО «Красноярский государственный технический университет». -
8. MOPS Minimum operational performance standards for global positioning system/wide area augmentation system airborne equipment // Document No. RTCA/DO229A. — June 8, 1998. — Prepared by SC-159, 1998.

*Статья поступила в редакцию: 20.10.2021 г.*

*Статья прошла рецензирование: 27.10.2021 г.*

*Статья принята в работу: 03.11.2021 г.*