

Исследование межчастотных задержек сигналов на борту навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС

Е. А. Карауш, Д. С. Печерица

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация,
e-mail: khanykova_ea@vniiftri.ru, pecheritsa_ds@vniiftri.ru*

Рассмотрена задача оценивания межчастотных задержек сигналов навигационных космических аппаратов системы ГЛОНАСС. Такие задержки излучения сигнала в радиочастотном тракте навигационных космических аппаратов являются источником инструментальной погрешности псевдодальномерных измерений. Предложен метод оценки межчастотных задержек сигналов, основанный на расчёте первых разностей псевдодальномерных измерений по навигационным космическим аппаратам, взаимное угловое положение которых отличается не более чем на 1° . Проведен эксперимент по оценке межчастотных задержек сигналов на основе разработанного метода. Эксперимент основан на использовании калиброванной навигационной аппаратуры потребителя для разделения погрешностей, вызванных задержками сигналов в приёмнике и навигационном космическом аппарате. Также для обеспечения наименьшего влияния ионосферного слоя Земли в обработку включены только те измерения, которые получены при малом значении полной электронной концентрации ТЕС. В качестве исходных данных использовали псевдодальномерные измерения по сигналам навигационных космических аппаратов систем ГЛОНАСС и GPS. Результаты оценивания для всех космических аппаратов орбитальной группировки системы ГЛОНАСС сравнены с формулярными значениями, предоставленными в составе навигационного кадра. Проанализированы результаты экспериментальных исследований, получены значения среднеквадратических отклонений задержек орбитальной группировки ГЛОНАСС. Для подтверждения адекватности результатов проведена проверка на внутреннюю сходимость результатов и определена погрешность разработанного метода оценки межчастотных задержек навигационных космических аппаратов.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы, ГЛОНАСС, GPS, задержка навигационного сигнала, навигационный космический аппарат, навигационное сообщение, ионосферная задержка сигнала, псевдодальномерные измерения.

Введение. Увеличение числа потребителей услуг глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в различных областях деятельности, а также необходимость обеспечения конкурентоспособного уровня отечественной системы ГЛОНАСС заставляют искать пути развития и совершенствования навигационных технологий. Одним из таких путей является учёт погрешностей измерений, порождаемых влиянием ряда факторов на распространение навигационного сигнала.

Исходной информацией для определения координат потребителя является время распространения сигнала от антенны навигационного космического аппарата (НКА) до навигационной аппаратуры потребителя (НАП) [1–4]. Задержки излучения сигнала в радиочастотном тракте НКА в поддиапазонах $L1$, $L2$ являются источником инструментальной погрешности псевдодальномерных измерений, которую необходимо учитывать при обработке измерений. Оценка межчастотной задержки, т. е. смещение излучаемых навигационных радиосигналов поддиапазона $L2$ относительно поддиапазона $L1$, осуществляется на Земле перед запуском НКА на орбиту и впоследствии транслируется в виде

значения этого смещения $\Delta\tau_n$ для n -го спутника в составе навигационного сообщения [2]. Значение $\Delta\tau_n$ относится к оперативной информации навигационного сообщения [5]. Однако значения межчастотных задержек в процессе эксплуатации НКА не соответствуют передаваемым в кадре, что делает задачу определения инструментальной погрешности псевдодальномерных измерений актуальной. При решении такой задачи возникает проблема разделения эффектов, зависящих от частоты навигационного сигнала, таких как задержка в ионосферном слое, бортовая задержка НКА, задержка сигнала в НАП [6–8].

Метод оценки задержек сигналов на борту НКА. Проведённое авторами исследование посвящено разработанному методу оценки бортовых межчастотных задержек сигналов НКА ГЛОНАСС по псевдодальномерным измерениям.

Ключевой проблемой при обработке псевдодальномерных измерений является задержка навигационного сигнала в ионосферном слое Земли. Скорость распространения навигационного сигнала в ионосфере зависит от числа свободных электронов, определяемых величиной полной электронной концентрации ТЕС (Total Electron Content) [4, 9].

Сложность оценки такой задержки заключается в том, что в настоящее время нет точной математической модели ионосферы или публикуемых данных о полной электронной концентрации TEC. Используемые для одночастотных измерений модели Klobuchar (для GPS) [10] и NeQuick (для Galileo) [11] позволяют снизить ионосферное влияние на сигналы до 50 % [3, 4]. Публикуемая международной ГНСС службой IGS информация о TEC в виде ионосферной карты также не обладает высокой точностью, так как погрешность в единицах величины TEC составляет 2–8 TEC Units ((2–8)·10¹⁶ электронов/м²) [3, 12, 13]. Также в результатах псевдодальномерных измерений присутствует задержка навигационного сигнала в НАП, значение которой трудно отделить от бортовой задержки сигнала [14–18].

Основная идея предложенного авторами метода заключается в обработке результатов измерений только от тех НКА, взаимное угловое положение которых отличается не более чем на 1°. Из-за выбора такой конфигурации НКА проблемы оценивания влияния атмосферы на время распространения сигнала не возникает.

Оценивание межчастотных задержек НКА выполнялось по следующим этапам.

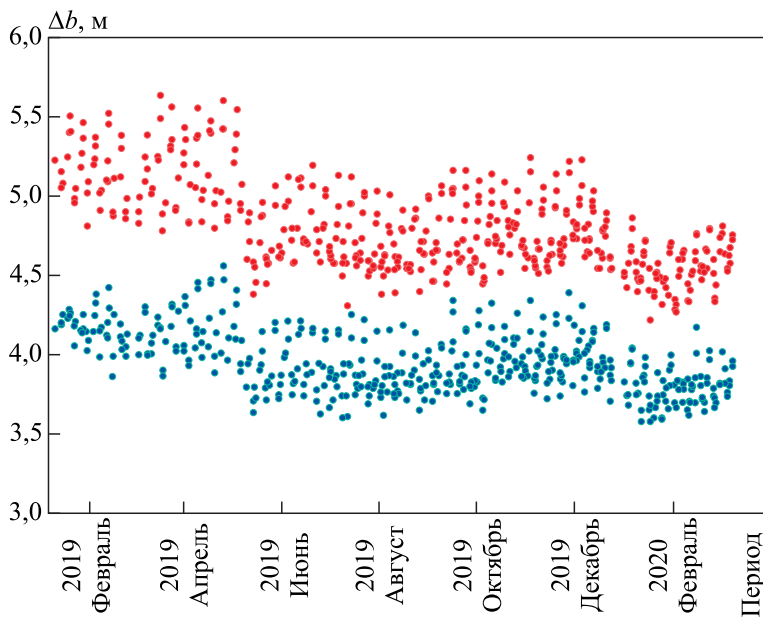


Рис. 1 Разница псевдодальномерных измерений между НКА R14, R04 орбитальной группировки ГЛОНАСС:
синие кружки $\Delta b^{R14R04}(L1)$ – разность псевдодальномерных измерений спутников R14, R04 в поддиапазоне L1; красные кружки $\Delta b^{R14R04}(L2)$ – разность псевдодальномерных измерений спутников R14, R04 в поддиапазоне L2

Fig. 1. The difference of pseudorange measurements between the GLONASS satellites R14 and R04:
blue circles $\Delta b^{R14R04}(L1)$ – difference of pseudorange measurements between the GLONASS satellites R14 and R04 in L1 band; red circles $\Delta b^{R14R04}(L2)$ – difference of pseudorange measurements between the GLONASS satellites R14 and R04 in L2 band

1. Обработка псевдодальномерных измерений по сигналам спутников ГЛОНАСС и GPS, находящихся на одной линии.

В качестве исходных данных применяли псевдодальномерные кодовые измерения R в поддиапазонах L1, L2 по сигналам систем ГЛОНАСС и GPS:

$$R = \rho + c(\Delta T_{\text{НКА}} - \Delta T_{\text{НАП}}) + b_m + b_t + b_i(f^{\text{НКА}}) + b_{\text{НКА}}(f^{\text{НКА}}) + b_{\text{НАП}}(f^{\text{НКА}}) + \varepsilon, \quad (1)$$

где

$\rho = \sqrt{(x_{\text{НКА}} - x_{\text{НАП}})^2 + (y_{\text{НКА}} - y_{\text{НАП}})^2 + (z_{\text{НКА}} - z_{\text{НАП}})^2}$ – геометрическая дальность, рассчитанная по координатам x, y, z НКА и НАП; c – скорость света; $\Delta T_{\text{НКА}}, \Delta T_{\text{НАП}}$ – уходы бортовой шкалы времени и шкалы НАП относительно системной шкалы ГНСС соответственно; b_m – погрешность, порожденная многолучевостью распространения сигнала; b_t – задержка сигнала в тропосферном слое Земли; $b_i(f^{\text{НКА}})$ – задержка сигнала в ионосферном слое Земли, значение которой зависит от частоты сигнала $f^{\text{НКА}}$; $b_{\text{НКА}}(f^{\text{НКА}}), b_{\text{НАП}}(f^{\text{НКА}})$ – задержки излучения сигнала на борту НКА и приёма в НАП; ε – случайная погрешность псевдодальномерных измерений.

Из уравнения (1) необходимо найти значения геометрической дальности ρ и уходы бортовых шкал времени НКА $\Delta T_{\text{НКА}}$. Для расчёта следует привлекать высокоточные эфемеридно-временные данные, публикуемые Информационно-аналитическим центром ГЛОНАСС. Для исключения из псевдодальности задержки сигнала в НАП $b_{\text{НАП}}(f^{\text{НКА}})$ авторы предлагают использовать калиброванную аппаратуру [18, 19]. Для оценки задержки сигнала НКА необходимо исключить составляющие уравнения (1) – задержки сигнала в НАП $b_{\text{НАП}}(f^{\text{НКА}})$ и ионосферную задержку $b_i(f^{\text{НКА}})$.

2. Расчёт разности псевдодальностей между спутниками A, B по НАП $R^A(t_k), R^B(t_k)$ на одной эпохе измерений t_k :

$$\Delta R^{AB}(t_k) = \underbrace{[b_i(f^A) - b_i(f^B)]}_{\Delta b_i^{AB}} + \underbrace{[b_{\text{НКА}}(f^A) - b_{\text{НКА}}(f^B)]}_{\Delta b_{\text{НКА}}^{AB}} + \varepsilon^{AB}, \quad (2)$$

где $\Delta R^{AB}(t_k)$ – разность псевдодальномерных измерений по НКА A, B на момент t_k ; $\Delta b_i^{AB} = b_i(f^A) - b_i(f^B)$ – разность между задержками сигналов в ионосферном слое; $\Delta b_{\text{НКА}}^{AB} = b_{\text{НКА}}(f^A) - b_{\text{НКА}}(f^B)$ – разность между задержками сигналов НКА A, B $b_{\text{НКА}}(f^A), b_{\text{НКА}}(f^B)$; ε^{AB} – случайная погрешность измерений.

Исключение задержки сигнала в НАП и ионосферной задержки возможно благодаря выбранной конфигурации НКА A, B.

Таким образом, результаты разности псевдодальностей в уравнении (2) представляют собой сумму случайной и систематической составляющих измерений.

Случайная составляющая – это погрешность измерений ϵ^{AB} из уравнения (2). К систематической составляющей отнесены разница бортовых задержек сигналов НКА А, В $\Delta b_{\text{НКА}}^{AB}$ и остаточный эффект влияния ионосферы $\Delta b_{\text{и}}^{AB}$, возникающий из-за разных значений частот сигналов НКА А, В, так как ионосфера является диспергирующей средой и время задержки навигационного сигнала зависит от частоты f^A , f^B [20]. Для обеспечения наименьшего влияния ионосферы на сигналы в обработке участвовали только измерения, полученные при малом значении ТЕС в ночное время.

3. Вычисление разности задержек между поддиапазонами $L1$, $L2$ $\Delta b^{AB}(L1-L2)$.

4. Оценка бортовых межчастотных задержек для орбитальной группировки ГЛОНАСС. Для выполнения оценки необходимо выбрать опорный НКА, относительно которого будут рассчитываться абсолютные значения бортовых задержек $\Delta b^{AB}(L1-L2)$ для орбитальной группировки.

Результатом обработки по изложенному методу будут оценки задержек сигналов НКА орбитальной группировки ГЛОНАСС.

Результаты оценивания межчастотных задержек на борту НКА. Обработка псевдодалномерных измерений проводилась по разработанному методу оценки бортовых задержек навигационных сигналов.

Для оценивания бортовых межчастотных задержек сигнала обрабатывались псевдодалномерные измерения по поддиапазонам $L1$, $L2$ с калиброванной НАП Javad Sigma за период с февраля 2019 г. по март 2020 г. В целях уменьшения погрешности от остаточного эффекта влияния ионосферы $\Delta b_{\text{и}}^{AB}$ в обработку включались псевдодалномерные измерения, проведённые во время наименьшей плотности электронов ТЕС в ионосферном слое. Были получены измерения ΔR^{AB} более чем по 100 парам НКА ГЛОНАСС и GPS. Опорным выбран НКА с наименьшим временем функционирования на орбите.

Графики полученных разностей псевдодалномерных измерений для спутников R14, R04 системы ГЛОНАСС приведены на рис. 1. Рассмотренный случай демонстрирует наличие в псевдодалномерных измерениях межчастотной задержки $\Delta b^{R14R04}(L1-L2)$.

В качестве опорного был выбран НКА R05 (с информационным номером 756). Относительно НКА R05 были рассчитаны значения для остальных спутников орбитальной группировки ГЛОНАСС. Средние квадратические отклонения (СКО) оценок задержек сигналов НКА представлены в табл. 1.

Анализ результатов оценивания межчастотных задержек НКА. Полученная измерительная информация позволила оценить межчастотные задержки сигналов НКА $\Delta b_{\text{НКА}}$ орбитальной группировки ГЛОНАСС. Для подтверждения адекватности результатов была проведена проверка на внутреннюю сходимость результатов, сравнены полученные оценки с формулярными значениями и определена погрешность разработанного метода оценки межчастотных задержек НКА.

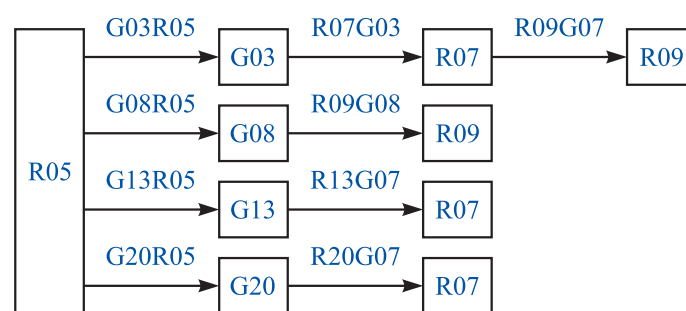


Рис. 2. Пример схемы расчёта межчастотных задержек на борту НКА: R – система ГЛОНАСС; G – система GPS; R05 – опорный спутник; G03R05 – разница между псевдодалномерными измерениями спутников G03 и R05

Fig. 2. Example scheme for calculating the satellite inter-frequency delays: R – designates a GLONASS system satellite; G – designates a GPS system satellite; R05 – supporting satellite; G03R05 is the difference of pseudorange measurements between the satellites G03 and R05

Таблица 1

Межчастотные задержки НКА ГЛОНАСС

Номер НКА (информационный номер)	СКО, м	Номер НКА (информационный номер)	СКО, м
R01 (730)	0,07	R13 (721)	0,13
R02 (747)	0,10	R14 (752)	0,16
R03 (744)	0,10	R15 (716)	0,20
R04 (742)	0,12	R16 (736)	0,17
R05 (756)	–	R17 (751)	0,08
R07 (745)	0,18	R18 (754)	0,15
R08 (743)	0,15	R20 (719)	0,15
R09 (702)	0,09	R21 (755)	0,11
R10 (717)	0,28	R22 (731)	0,20
R11 (753)	0,11	R23 (732)	0,13
–	–	R24 (735)	0,22

Большое число сформированных разностей псевдодалномерных измерений ΔR^{AB} позволило получить оценки бортовых межчастотных задержек сигналов с использованием данных по разным парам НКА (рис. 2). Расчёт задержки НКА с привлечением отличных разниц псевдодалномерных измерений ΔR^{AB} показал сходимость результатов обработки измерений.

Проведено сравнение оценок бортовых межчастотных задержек с формулярными значениями орбитальной группировки ГЛОНАСС. Наибольшую разницу между полученными оценками и формулярными значениями имеют НКА 716 (R15), 717 (R10), 719 (R20), 730 (R01), 732 (R23). Стоит отметить, что НКА 716 и 717 запущены на орбиту одновременно и имеют отклонения от формулярных значений. Измерения по НКА 716 обрабатывались в период с февраля по ноябрь 2018 г., затем аппарат был переведён в состав орбитального резерва, а взамен него введён НКА 757 [8],

Таблица 2

Бюджет погрешности разработанного метода

Составляющие Θ_i	СКО, см
Апостериорные эфемериды НКА	3,0
Частотно-временные поправки	3,0
Координаты НАП	1,0
Инструментальная погрешность НАП	6,0
Погрешность влияния ионосферы	2,7

обработка измерений которого не проводилась. Перечисленные спутники функционируют на орбите более 110 месяцев.

Наименьшее расхождение между полученными оценками и формулярными значениями имеют НКА 736 (R16), 745 (R07), 751 (R17), 753 (R11), 755 (R21). Разница между оценками задержек и формулярными значениями из навигационного сообщения не превышает 2 нс.

Погрешность метода оценки межчастотных задержек НКА вычисляется согласно ГОСТ Р 8.736-2011 «ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения». В число составляющих неисключённой систематической погрешности измерений Θ_i отнесены точность эфемеридно-временной информации, погрешность определения координат НАП, инструментальная погрешность, погрешность, порождённая различным влиянием ионосферы на время запаздывания навигационных сигналов с различными частотами (табл. 2).

Границы погрешности Δ оценки задержки НКА рассчитываются как

$$\Delta = K\sqrt{S_{\Theta}^2 + S_{\bar{x}}^2},$$

где $K=1,8$ – коэффициент, зависящий от соотношения случайной составляющей погрешности и несмещённой систематической погрешности;

$S_{\Theta} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \Theta_i^2} / \sqrt{3}$ – СКО несмещённой систематической погрешности, рассчитываемое по значениям составляющих Θ_i погрешности (см. табл. 2) [9]; m – число составляющей несмещённой систематической погрешности;

$S_{\bar{x}} = S/\sqrt{n}$ – СКО оценки измеряемой величины для n измерений; $S=15$ см – СКО однократного псевдодалномерного измерений.

Таким образом, границы погрешности оценки межчастотной задержки НКА $\Delta=9$ см.

Заключение. Разработан метод оценивания межчастотных задержек НКА орбитальной группировки ГЛОНАСС по псевдодалномерным измерениям. Проведено сравнение оценок межчастотных задержек НКА с формулярными значениями. Особенность реализации заключается в малом количестве подходящих пар спутников систем ГЛОНАСС и GPS, возможности применения измерений, проведённых в период наименьшей плотности электронов ТЕС, а также в необходимости выбора опорного НКА из орбитальной группировки, относительно которого определяются инструментальные погрешности.

Список литературы

1. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J., *Global Positioning System. Theory and Practice*, Springer-Verlag Wien GmbH, 2001, 404 p. DOI 10.1007/978-3-7091-6199-9
2. Перов А. И., Харисов В. Н., Бакитько Р. В., Болденков Е. Н., Булавский Н. Т., Дворкин В. В., Ефименко В. С., Косенко В. Е., Нартов В. Я., Мерой А. И., Перьков А. Е., Тюбалин В. В., Урличич Ю. М., Харисов В. Н., Чеботарев В. Е., Шатилов А. Ю. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. Н. Перова, В. Н. Харисова. 4-е изд. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
3. Sanz Subirana J., Juan Zornoza J. M., Hernández-Pajares M., *GNSS Data processing. Volume 1: Fundamentals and Algorithms*, ESA Communications: Noordwijk, 2013, 223 p., available at: https://gssc.esa.int/navipedia/GNSS_Book/ESA_GNSS-Book_TM-23_Vol_1.pdf (accessed: 14.02.2020).
4. Altamimi Z., Antreich F., Beard R., Bolkunov A., Braasch M. S., Burger T., Cardellach E., Curran J. T., Defraigne P., Eissfeller B., Elgered G., Falcone M., Farnworth R., Farrell J. A., Freymueller J., Ganeshan A. S., Gao S., Giorgi G., Gross R., Hahn J., Hauschild A., Hausler G., Hegarty C. J., Hobiger T., Hugentobler U., Humphreys T., Jakowski N., Jekeli C., Johnston G., Kealy A., Kogure S., Kouba J., Lahaye F., Langley R. B., MacLeod K., Maqsood M., Meurer M., Montenbruck O., Moore T., Odijk D., Pany T., Petovello M. G., Pullen S., Revniviykh S., Riddell A., Rius A., Rizos C., Senior K., Serdyukov A., Springer T., Steigenberger P., Tang J., Tetreault P., Teunissen P. J. G., Verhagen S., Walter T., Wanning L., Weiss J. P., Wendel J., Wickert J., Won J.-H., Yang Y., *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, eds. Peter J. G. Teunissen, Oliver Montenbruck, GmbH, Leipzig, 2017, 1327 p. DOI 10.1007/978-3-319-42928-1
5. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. 5.1 изд. М.: РНИИКП, 2008, 74 с., URL: http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLOPASS_rus_v5.1.pdf (дата обращения: 14.02.2020).
6. Montenbruck O., Hauschild A., Steigenberger P., *Navigation – Journal of The Institute of Navigation*, 2014, no. 61 (3), pp. 191–201. DOI: 10.1002/navi.64
7. Montenbruck O., Steigenberger P., Prange L., Deng Z., Zhao Q., Perosanz F., Romero I., Noll C., Stürze A., Weber G., Schmid R., MacLeod K., Schaer S., *Advances in Space Research*, 2017, vol. 59, no. 7, pp. 1671–1697. DOI: 10.1016/j.asr.2017.01.011
8. Reussner N., Wanning L. GLONASS Inter-frequency Biases and Their Effects on RTK and PPP Carrier-phase Ambiguity Resolution. *Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2011)*, Portland, OR, September 2011, pp. 712–716.
9. Ciralo L., Azpilicueta F., Brunini C., Meza A., Radicella S. M., *Journal of Geodesy*, 2007, vol. 81, pp. 111–120. DOI: 10.1007/s00190-006-0093-1
10. Klobuchar J., *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1987, vol. AES-23, no. 3, pp. 325–331. DOI: 10.1109/TAES.1987.310829

11. European Union. European GNSS (Galileo) Open Service-Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Frequency Users. 1.2, available at: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_Ionospheric_Model.pdf (accessed: 14.02.2020).

12. Schaer S., Gurtner W., Feltens J., IONEX: The IONosphere map Exchange Format Version 1.1. *Proceedings of the IGS AC Workshop*, Darmstadt, Germany, 9–11 February 2015, available at: <http://ftp.aiub.unibe.ch/ionex/draft/ionex11.pdf> (accessed: 14.02.2020).

13. Mannucci A. J., Wilson B. D., Yuan D. N., Ho C. H., Lindqwister U. J., Runge T. F., *Radio Science*, 1998, vol. 33, no. 3, pp. 565–582.

14. Ammar M., Aquino M., Vadakke Veetil S., *GPS Solutions*, 2018, vol. 2, pp. 22–32. DOI: 10.1007/s10291-018-0700-7

15. Wang N., Yuan Y., Li Z., Montenbruck O., Tan B., *Journal of Geodesy*, 2016, vol. 90, no. 3, pp. 209–228, DOI 10.1007/s00190-015-0867-4

16. Mylnikova A. A., Yasyukevich Yu. V., Kunitsyn V. E., *Results in Physics*, 2015, vol. 5, pp. 9–10. DOI: 10.1016/j.rinp.2014.11.002

17. Wilson B. D., Yinger C. H., Feess W. A., Shank C., *GPS World*, 1999, vol. 10, no. 9, pp. 56–66, available at: <http://hdl.handle.net/2014/18173> (accessed: 14.02.2020).

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

19. Kouba J., A guide to using International GNSS Service (IGS) products. 2009. Available at: http://kb.igs.org/hc/en-us/article_attachments/203088448/UsingIGSProductsVer21_cor.pdf (accessed: 20.12.2019).

20. Petit G., Luzum B., *IERS Conventions. 2010*, Frankfurt am Main, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010, 179 p., available at: <http://iers-conventions.obspm.fr/content/tn36.pdf> (accessed: 14.02.2020).

Reference

1. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J., *Global Positioning System. Theory and Practice*, Springer-Verlag Wien GmbH, 2001, 404 p. DOI 10.1007/978-3-7091-6199-9

2. Perov A. I., Kharisov V. N., Bakit'ko R. V., Boldenkov E. N., Bulavskii N. T., Dvorkin V. V., Efimenko B. C., Kosenko V. E., Nartov V. Ya., Meroi A. I., Per'kov A. E., Tyubalin V. V., Urlichich Yu. M., Kharisov V. N., Chebotarev V. E., Shatilov A. Yu., *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* / Ed. by A. N. Perova, V. N. Kharisova, Moscow, Radiotekhnika, 2010, 800 p. (in Russian).

3. Sanz Subirana J., Juan Zornoza J. M., Hernández-Pajares M., *GNSS Data processing. Volume 1: Fundamentals and Algorithms*, ESA Communications: Noordwijk, 2013, 223 p.,

available at: https://gssc.esa.int/navipedia/GNSS_Book/ESA_GNSS-Book_TM-23_Vol_I.pdf (accessed: 14.02.2020).

4. Altamimi Z., Antreich F., Beard R., Bolkunov A., Braasch M. S., Burger T., Cardellach E., Curran J. T., Defraigne P., Eissfeller B., Elgered G., Falcone M., Farnworth R., Farrell J. A., Freymueller J., Ganeshan A. S., Gao S., Giorgi G., Gross R., Hahn J., Hauschild A., Hausler G., Hegarty C. J., Hobiger T., Hugentobler U., Humphreys T., Jakowski N., Jekeli C., Johnston G., Kealy A., Kogure S., Kouba J., Lahaye F., Langley R. B., MacLeod K., Maqsood M., Meurer M., Montenbruck O., Moore T., Odijk D., Pany T., Petovello M. G., Pullen S., Revniviykh S., Riddell A., Rius A., Rizos C., Senior K., Serdyukov A., Springer T., Steigenberger P., Tang J., Tetreault P., Teunissen P. J. G., Verhagen S., Walter T., Wanninger L., Weiss J. P., Wendel J., Wickert J., Won J.-H., Yang Y., *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, eds. Peter J. G. Teunissen, Oliver Montenbruck, GmbH, Leipzig, 2017, 1327 p. DOI 10.1007/978-3-319-42928-1

5. Interfeisnyi kontrol'nyi dokument GLONASS. 5.1 edition, Moscow, RNIKP, 2008, 74 p. (in Russian), available at: http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf (accessed: 14.02.2020).

6. Montenbruck O., Hauschild A., Steigenberger P., *Navigation – Journal of The Institute of Navigation*, 2014, no. 61 (3), pp. 191–201. DOI: 10.1002/navi.64

7. Montenbruck O., Steigenberger P., Prange L., Deng Z., Zhao Q., Perosanz F., Romero I., Noll C., Stürze A., Weber G., Schmid R., MacLeod K., Schaer S., *Advances in Space Research*, 2017, vol. 59, no. 7, pp. 1671–1697. DOI: 10.1016/j.asr.2017.01.011

8. Reussner N., Wanninger L. GLONASS Inter-frequency Biases and Their Effects on RTK and PPP Carrier-phase Ambiguity Resolution. *Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2011)*, Portland, OR, September 2011, pp. 712–716.

9. Ciraolo L., Azpilicueta F., Brunini C., Meza A., Radicella S. M., *Journal of Geodesy*, 2007, vol. 81, pp. 111–120. DOI: 10.1007/s00190-006-0093-1

10. Klobuchar J. Ionospheric Time-Delay Algorithms for Single-Frequency GPS Users. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1987, vol. AES-23, no. 3, pp. 325–331. DOI: 10.1109/TAES.1987.310829

11. European Union. European GNSS (Galileo) Open Service-Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Frequency Users. 1.2, available at: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_Ionospheric_Model.pdf (accessed: 14.02.2020).

12. Schaer S., Gurtner W., Feltens J., IONEX: The IONosphere map Exchange Format Version 1.1. *Proceedings of the IGS AC Workshop*, Darmstadt, Germany, 9–11 February 2015, available at: <http://ftp.aiub.unibe.ch/ionex/draft/ionex11.pdf> (accessed: 14.02.2020).

13. Mannucci A. J., Wilson B. D., Yuan D. N., Ho C. H., Lindqwister U. J., Runge T. F., *Radio Science*, 1998, vol. 33, no. 3, pp. 565–582.

14. Ammar M., Aquino M., Vadakke Veetil S., *GPS Solutions*, 2018, vol. 2, pp. 22–32. DOI: 10.1007/s10291-018-0700-7

15. Wang N., Yuan Y., Li Z., Montenbruck O., Tan B., *Journal of Geodesy*, 2016, vol. 90, no. 3, pp. 209–228, DOI 10.1007/s00190-015-0867-4

16. Mylnikova A. A., Yasyukevich Yu. V., Kunitsyn V. E., *Results in Physics*, 2015, vol. 5, pp. 9–10. DOI: 10.1016/j.rinp.2014.11.002

17. Wilson B. D., Yinger C. H., Feess W. A., Shank C., *GPS World*, 1999, vol. 10, no. 9, pp. 56–66, available at: <http://hdl.handle.net/2014/18173> (accessed: 14.02.2020).

18. Pecheritsa D. S., Fedotov V. N. *Kalibrovka bezzaprosnykh izmeritel'nykh sistem GLONASS s obespechenie proslzhivaemosti k gosudarstvennym pervichnym etalonam edinit velichin*, Abstracts of Papers VII Conference «Fundamental'noe i prikladnoe koordinatno-vremennoe i navigatsionnoe obespechenie»

(KVNO-2017), April 17–21, 2017, St. Petersburg, IAA RAS, 2017, pp. 204–205 (in Russian).

19. Kouba J., A guide to using International GNSS Service (IGS) products. 2009. Available at: http://kb.igs.org/hc/en-us/article_attachments/203088448/UsingIGSProductsVer21_cor.pdf (accessed: 20.12.2019).

20. Petit G., Luzum B., *IERS Conventions. 2010*, Frankfurt am Main, Verlag des Bundesamts fur Kartographie und Geodasie, 2010, 179 p., available at: <http://iers-conventions.obspm.fr/content/tn36.pdf> (accessed: 14.02.2020).

Дата поступления: 08.10.2019.

Дата принятия: 08.11.2019.

A Study Interfrequency Onboard Delays of Signals Navigation Satellites GLONASS

Ekaterina A. Karaush, Dmitry S. Pecheritsa

Federal State Unitary Enterprise Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow region, Russian Federation, e-mail: khanykova_ea@vniiftri.ru, pecheritsa_ds@vniiftri.ru

The problem of interfrequency signal delays estimation of GLONASS system navigation satellite is considered. Such delays in the radio-frequency message of navigation satellites are the source of the instrumental error of pseudorange measurements. The estimation method of interfrequency signal delays is proposed, based on the calculation of first differences of pseudorange measurements on navigation satellites, the relative position of which differs by no more than 1° . The experiment on estimation of inter-frequency delays signal on the basis of the developed method was conducted. The experiment is based on the use of calibrated navigation receiver to separate errors caused by signal delays in the receiver and navigation satellite. Also, to minimize the effects of the Earth's ionosphere layer navigation signal delay, only those measurements taken at a low Total Electronic Concentration TEC are included in the processing. Pseudorange measurements using GLONASS and GPS navigation satellites signals were used as the main source data. The results of the estimation for all GLONASS orbital group satellites were compared with the form values provided in the navigation message. The results of experimental research have been analyzed and the values of standard deviation of GLONASS orbital group delays have been obtained. To confirm the adequacy of the results was checked for internal convergence of the results and determined the error of the developed method for assessing the interfrequency delays of navigation spacecraft.

Key words: global navigation satellite system, GLONASS, navigation signal delay, navigation satellite, navigation message, ionosphere signal delay, pseudorange measurements.