

УДК 629.783

doi: 10.18698/0536-1044-2021-12-100-106

Калибровка бортовой аппаратуры измерения псевдодальности между космическими аппаратами для повышения точности определения расхождения их шкал времени

В.С. Ганжа, Т.А. Марарескул, Д.С. Муратов

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва»

Calibration of Onboard Equipment for Measuring Pseudo-Range Between Spacecraft to Improve the Accuracy of Determining Their Time Scales Discrepancy

V.S. Ganzha, T.A. Marareskul, D.S. Muratov

ISS-Reshetnev Company

Для решения целевых задач современных космических аппаратов (КА) применяются технологии, связанные с проведением дальномерных измерений между ними. Стабильность систематической погрешности является одним из основных факторов, влияющих на точность решения целевой задачи. Это обуславливает требование по обеспечению стабильности систематической погрешности на уровне единиц сантиметров при наличии дестабилизирующих факторов и тенденции к повышению срока активного существования КА на орбите. Помимо поиска методов решения этой проблемы, реализуемых непосредственно в бортовой аппаратуре, целесообразно рассматривать математические методы, применимые на этапе обработки измерений при решении целевых задач КА. Описана технология определения и учета калибровочных поправок для бортовой радиотехнической аппаратуры КА, предназначенной для дальномерных измерений и обмена информацией между ними. Предлагаемая технология основана на статистической обработке невязок линейных комбинаций измеряемых параметров относительно их высокоточных расчетных аналогов, получаемых с использованием апостериорной эфемеридно-временной информации. Применение такой технологии позволяет компенсировать изменение постоянной составляющей систематической погрешности измерений при эксплуатации КА на орбите.

Ключевые слова: калибровка бортовой аппаратуры, калибровочные поправки к измерениям, систематическая погрешность, межспутниковая радиолиния, аппаратурные задержки

Technologies for range-finding measurements between spacecraft are increasingly used in achieving the targets of modern spacecraft. The stability of the systematic error is one of the main factors affecting the accuracy of achieving a target. This determines the requirement to ensure the stability of the systematic error at the level of several centimeters in the presence of destabilizing factors and a tendency to increase the spacecraft's active life in orbit. Apart from searching for methods implemented directly in the onboard equipment, it is advisable

to consider mathematical methods that are applicable at the stage of processing measurements when achieving the spacecraft targets. The paper describes the technology for determining and accounting for calibration corrections for spacecraft onboard radio-technical equipment intended for range-finding measurements and exchanging information between spacecraft. This technology is based on statistical processing of residuals of linear combinations of measured parameters relative to their high-precision calculated analogs, obtained using a posteriori ephemeris-time information. The use of this technology makes it possible to compensate for the change in the constant component of the systematic measurement error at the stage of spacecraft operation in orbit.

Keywords: calibration of onboard equipment, calibration corrections to measurements, systematic error, inter-satellite radio link, hardware delays

Для решения прикладных задач, возлагаемых на современные космические комплексы, применяются технологии, основанные на использовании бортовой аппаратуры, осуществляющей радиотехнические псевдодальномерные измерения и обмен информацией между космическими аппаратами (КА), работающими на орбитах разного типа.

К точностным характеристикам межспутниковых измерений предъявляются достаточно жесткие требования, так как они относятся к основным факторам, влияющим на эффективность решения таких задач. В частности, требуется обеспечить аппаратурную систематическую погрешность на уровне единиц сантиметров, что при длительных сроках функционирования современных КА на орбите является сложной научно-технической задачей.

Бюджет систематической погрешности измерений, включающей в себя постоянную и медленноменяющуюся составляющие, складывается из остаточной погрешности калибровки приемопередающих трактов бортовой измерительной аппаратуры на этапе ее изготовления, а также изменения (нестабильности) аппаратурных задержек сигналов в условиях эксплуатации.

Вследствие воздействия факторов различной природы (непрогнозируемых изменений температуры, деградации свойств материалов на длительных интервалах эксплуатации, автоматической реконфигурации приборов приемного или передающего трактов и др.) с течением времени постоянная составляющая систематической погрешности изменяется и ее отклонение от значения, определенного на этапе изготовления КА, может существенно превышать допустимое.

Неопределенность и нестабильность аппаратурных задержек измерительной аппаратуры, используемой в космических системах, обусло-

вили разработку различных методических подходов для определения калибровочных поправок (КП), применимых в процессе ее эксплуатации [1–7].

При эксплуатации наземных измерительных средств прецизионную калибровку измерительных трактов можно проводить методами, основанными на определении задержек с помощью имитаторов сигналов [8–10], на использовании эталонов, прослеживаемых к государственным первичным эталонам единиц величин [11], на сравнении результатов измерений калибруемых приборов и приборов, для которых метрологические характеристики нормированы [12].

Однако такие подходы нельзя применить в бортовой аппаратуре КА, функционирующей на орбите. Это обусловило необходимость разработки и внедрения технологий, предполагающих определение в наземном вычислительном центре и использование в бортовом программном обеспечении КА актуальных значений КП к межспутниковым измерениям при эксплуатации на орбите.

Одной из актуальных задач, решаемых с помощью взаимных измерений между КА, является определение расхождения шкал времени (ШВ) их бортовых стандартов частоты. Для ее решения применяют разностную линейную комбинацию встречных псевдодальномерных измерений между парами КА, проводимых в близкие моменты времени.

Изменение с течением времени систематической погрешности измерений псевдодальномерности приводит к снижению адекватности ранее определенных и применяемых КП, что вызывает соответствующее снижение точности определения расхождения ШВ пар КА.

Измеренная бортовой аппаратурой псевдодальность содержит составляющую систематической погрешности, обусловленную задерж-

кой сигнала как в передающем тракте КА, излучавшем сигнал, так и в приемном тракте КА, на котором проведено измерение. При статистической обработке массива таких измерений можно оценить суммарное значение обеих составляющих, но нельзя выделить задержку сигнала в приемнике или передатчике.

Измеряемыми параметрами являются разности противонаправленных измерений, поэтому каждый параметр содержит четыре составляющие аппаратурной систематической погрешности, обусловленные задержками в передающих и приемных трактах пары КА. Это обстоятельство позволяет использовать в качестве КП общую задержку без выделения ее отдельных составляющих.

Технология определения КП включает в себя следующие этапы:

- проведение измерений на борту КА, обмен ими между КА, формирование массива пар противонаправленных измерений и предварительная обработка в бортовом программном обеспечении;
- сбор измерительной информации в наземном центре обработки;
- обработка измерительной информации, полученной ото всех КА, и принятие решения о необходимости коррекции ранее полученных и применяемых на борту КА значений КП;
- формирование массивов КП для всех комбинаций пар КА;
- закладка массивов КП на все КА;
- использование обновленных значений КП в бортовом программном обеспечении КА при решении целевой задачи.

Рассмотрим подробнее содержание указанных этапов. Для решения поставленной задачи можно использовать измерительную информацию, получаемую как по штатному плану работ, реализуемому для решения целевой задачи КА, так и на специально спланированных сеансах.

В результате проведенных сеансов измерений и обмена информацией между КА на каждом из них формируется массив собственных оценок радионавигационного параметра задержки сигнала и аналогичных оценок, полученных другими КА.

При условии прохождения линии визирования между парой КА выше области ионосферы Земли можно принять следующую математическую модель псевдодальномерного навигационного параметра:

$$S_{ijk}(t) = c \left[T_{ijk}(t_i) - \Delta T_i^{\text{ППМ}}(t) - \Delta T_{jk}^{\text{ППД}}(t) \right] + \Delta D_{ijk}^{\text{ШВС}}(t) + \Delta D_{ijk}^{\text{рел}}(t) + \Delta D_{ijk}^{\text{ФЦ}}(t) + \xi_{ijk}(t), \quad (1)$$

где i — номер КА, для которого определяются расхождения ШВ относительно ШВ других КА; j_k — номер КА, излучавшего измерительный сигнал, $k \in [1, K]$ (K — количество КА, проводивших взаимные измерения с i -м КА); c — скорость света в вакууме; $T_{ijk}(t_i)$ — измеренная на i -м КА задержка сигнала от j_k -го КА; t — момент по общей ШВ для всех КА, одноименный моменту времени t_i привязки измерения на i -м КА; $\Delta T_i^{\text{ППМ}}(t)$ — аппаратурная задержка сигнала в приемном тракте i -го КА; $\Delta T_{jk}^{\text{ППД}}(t)$ — аппаратурная задержка сигнала в передающем тракте j_k -го КА; $\Delta D_{ijk}^{\text{ШВС}}(t)$ — поправка для привязки измерения к моменту времени t по ШВ системной (ШВС); $\Delta D_{ijk}^{\text{рел}}(t)$ — поправка для компенсации релятивистских эффектов распространения сигнала; $\Delta D_{ijk}^{\text{ФЦ}}(t)$ — поправка, компенсирующая смещение фазового центра (ФЦ) приемной антенны на i -м КА и передающей антенны на j_k -м КА относительно центра масс, вычисленная на момент времени t ; $\xi_{ijk}(t)$ — погрешность модели.

Поправки $\Delta D_{ijk}^{\text{ШВС}}(t)$, $\Delta D_{ijk}^{\text{рел}}(t)$, $\Delta D_{ijk}^{\text{ФЦ}}(t)$ представляют собой функции текущего взаимного положения КА и расхождения их часов относительно системного времени.

После каждого сеанса в бортовом программном обеспечении должен быть выполнен входной контроль результатов измерений для исключения аномальных значений.

По выборкам собственных (прямых) измерений i -го КА и принятых по межспутниковой радиолинии (встречных) измерений КА с номерами j_k составляются пары прямых и обратных измерений, разность моментов времени проведения которых не превышает величину Δt , соответствующую наиболее близким по времени противонаправленным измерениям.

Для каждой из сформированных пар прямого и встречного единичных измерений вычисляется разность $S_{ijk}^{\Delta}(t) = S_{ijk}(t) - S_{jki}(t + \Delta t)$, используемая для определения расхождения ШВ пар КА, как описано в работе [13].

С учетом формулы (1) математическая модель разностного псевдодальномерного навигационного параметра S_{ijk}^{Δ} , формируемого по противонаправленным измерениям пары КА (i, j_k), можно представить в виде

$$\begin{aligned}
S_{ijk}^{\Delta}(t) = & c \left\{ T_{ijk}^i(t_i) - T_{jki}^i(t_{jk} + \Delta t) - \left[\Delta T_i^{\text{ПРМ}}(t) + \right. \right. \\
& \left. \left. + \Delta T_{jk}^{\text{ПРД}}(t) - \Delta T_{jk}^{\text{ПРМ}}(t + \Delta t) - \Delta T_i^{\text{ПРД}}(t + \Delta t) \right] \right\} + \\
& + \Delta D_{ijk}^{\text{ШВС}}(t) - \Delta D_{jki}^{\text{ШВС}}(t + \Delta t) + \Delta D_{ijk}^{\text{ПЕЛ}}(t) - \\
& - \Delta D_{jki}^{\text{ПЕЛ}}(t + \Delta t) + \Delta D_{ijk}^{\text{ФП}}(t) - \Delta D_{jki}^{\text{ФП}}(t + \Delta t) + \\
& + \xi_{ijk}(t) - \xi_{jki}(t + \Delta t), \quad (2)
\end{aligned}$$

где t_i и t_{jk} — моменты привязки прямого и обратного измерений, зафиксированные по ШВ i -го и j_k -го КА соответственно, одноименные с моментом времени t по ШВС.

Как видно из формулы (2), для устранения постоянной составляющей систематической погрешности разностного параметра $S_{ijk}^{\Delta}(t)$ достаточно оценить комбинацию аппаратурных задержек вида $\Delta T_i^{\text{ПРМ}} + \Delta T_{jk}^{\text{ПРД}} - \Delta T_{jk}^{\text{ПРМ}} - \Delta T_i^{\text{ПРД}}$ без необходимости выделения ее отдельных составляющих.

Если отсутствует возможность доставки в центр обработки значительного объема сырых (необработанных) измерений, то на борту КА допустимо сглаживать разностные параметры по данным массивов $\{S_{ijk}^{\Delta}(t_n)\}_{n=1..N}$ и формировать сеансные значения $\hat{S}_{ijk}^{\Delta}(\hat{t}_n)$, где \hat{t} — общий для всех КА момент времени на интервале сеанса. Такой подход позволит снизить объем данных при сохранении необходимой информации о систематической погрешности.

Накопление и обработка сглаженных сеансных значений разностных параметров ото всех КА осуществляется в наземном центре обработки и включает в себя математическую интерпретацию, расчет статистических характеристик и принятие решения о необходимости коррекции применяемых на текущий момент значений КП.

Разностному параметру $S_{ijk}^{\Delta}(t)$ соответствует расчетный аналог

$$\tilde{S}_{ijk}^{\Delta}(t) = D_{ijk}^{\text{геом}}(t) - D_{jki}^{\text{геом}}(t + \Delta t) + 2c\Delta T_{ij}(t),$$

где $D_{ijk}^{\text{геом}}(t)$ и $D_{jki}^{\text{геом}}(t + \Delta t)$ — геометрическая дальность между центрами масс i -го и j_k -го КА на моменты t и $t + \Delta t$ соответственно, вычисляемая с учетом изменения положения принимающего КА за время распространения сигнала; $\Delta T_{ij}(t)$ — расхождение ШВ i -го КА относительно ШВ j_k -го КА.

На мерном интервале, продолжительность которого зависит как от объема выборки и

частоты измерений в ней, так и от фактически наблюдаемого характера систематической погрешности, для каждого элемента массивов $\{\hat{S}_{ijk}^{\Delta}(\hat{t}_m)\}_{m=1..M_k}$ формируются массивы невязок измеренных значений разностных параметров относительно их расчетных аналогов $\tilde{S}_{ijk}^{\Delta}(\hat{t}_m)$, получаемых с использованием эталонной эфемеридно-временной информации. Здесь M_k — количество элементов в массиве для пары (i, j_k) КА на мерном интервале.

Средние значения невязок вычисляются по формуле

$$\Delta S_{ijk}^{\Delta} = \frac{1}{M_k} \sum_{m=1}^{M_k} \left[\hat{S}_{ijk}^{\Delta}(\hat{t}_m) - \tilde{S}_{ijk}^{\Delta}(\hat{t}_m) \right]. \quad (3)$$

Сформированные таблицы КП, рассчитанных по выражению (3), загружают в бортовые компьютеры всех КА, чтобы использовать при формировании разностных навигационных параметров по формулам (2).

Следует отметить, что точность такого способа калибровки приемо-передающих каналов бортовой аппаратуры ограничена погрешностью эталонной эфемеридно-временной информации.

В качестве эталонной информации целесообразно применять доступные апостериорные данные одного из центров обработки [14–16], при выборе которого необходимо учитывать достаточность точностных характеристик предоставляемых данных для решения целевой задачи КА и длительность операционной задержки выдачи этих данных.

Для поддержания высокой точности определения расхождений ШВ пар КА необходимо осуществлять регулярный контроль адекватности текущих значений КП и их своевременное обновление.

Автоматизация передачи измерительной информации с борта КА и ее обработки в центре позволит осуществлять расчет с произвольной требуемой частотой, обеспечивающей достижение максимально возможной точности определения КП, исходя из наблюдаемой вариабельности значений аппаратурных задержек.

Регулярная автоматическая калибровка позволит не только компенсировать изменяющуюся постоянную составляющую систематической погрешности бортовой измерительной аппаратуры, но и снизить влияние долгопериодиче-

ских составляющих медленноменяющейся составляющей.

В процедуре введения нового КА в систему межспутниковых измерений должен предусматриваться начальный этап, на котором проводится калибровка измерительных трактов этого КА по результатам обработки взаимных измерений с КА, уже функционирующими в системе.

Вывод

Применение предложенной технологии позволяет компенсировать влияние изменения аппаратурных задержек бортовой аппаратуры в процессе орбитального функционирования относительно значений, определяемых на этапе изготовления, на решение целевых задач КА.

Литература

- [1] Печерица Д.С., Бурцев С.Ю. Калибровка наземной измерительной станции ГЛОНАСС с параболической антенной в части систематической погрешности измерения псевдодальности. *АПЭП-2018. Тр. XIV Межд. науч.-тех. конф.* Т. 3. Новосибирск, НГТУ, 2018, с. 39–42.
- [2] Гребенников А.В., Кондратьев А.С., Кудревич А.П. и др. Калибровка систематической задержки в радионавигационной аппаратуре ГНСС, обеспечивающей определение пространственной ориентации. *Успехи современной радиоэлектроники*, 2013, № 9, с. 26–32.
- [3] Фатеев Ю.Л., Дмитриев Д.Д., Коннов В.Г. Калибровка измерительного тракта для испытания навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем на помехоустойчивость. *Вестник СибГАУ*, 2012, № 4, с. 139–142.
- [4] Куличкова Н.С., Куличков К.А., Гребенников А.В. Результаты оценки инструментальной задержки определения беззапросной дальности по сигналам ГЛОНАСС и GPS. *Успехи современной радиоэлектроники*, 2018, № 12, с. 54–57.
- [5] Тупицын И.Н., Жиганов К.А., Зотов С.М. Технология и результаты экспериментальных расчетов относительных межлитерных калибровок аппаратуры потребителей. *Труды института прикладной астрономии РАН*, 2013, № 27, с. 550–553.
- [6] Печерица Д.С. Калибровка навигационной аппаратуры потребителей системы ГЛОНАСС. *Альманах современной метрологии*, 2018, № 15, с. 164–171.
- [7] Крат Н.М., Ермолаев М.В., Марарескул Д.И. Контроль точностных характеристик беззапросных измерительных станций из состава наземного сегмента космического комплекса системы ГЛОНАСС. В: *Системы связи и радионавигации*. Красноярск, Радиосвязь, 2018, с. 119–122.
- [8] Жуков А.Н., Зотов С.М., Тупицын И.Н. Результаты экспериментальной отработки расчета калибровочных данных для радиотехнических средств ГЛОНАСС с использованием имитатора навигационного сигнала. *Метрология времени и пространства. Мат. VII Межд. симп.* Менделеево, ВНИИФТРИ, 2014, с. 198–200.
- [9] Печерица Д.С., Федотов В.Н. Калибровка имитаторов сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. *Измерительная техника*, 2018, № 8, с. 60–64, doi: <https://doi.org/10.32446/0368-1025it-2018-8-60-64>
- [10] Печерица Д.С. Метод калибровки имитаторов сигналов системы ГЛОНАСС и зарубежных космических навигационных систем. В: *Метрология в XXI веке*. Менделеево, ВНИИФТРИ, 2018, с. 118–129.
- [11] Печерица Д.С. *Метод калибровки навигационной аппаратуры потребителей ГЛОНАСС с использованием эталонов, прослеживаемых к государственным первичным эталонам единиц величин*. Дис. ... канд. тех. наук. Менделеево, ВНИИФТРИ, 2018.
- [12] Жуков А.Н., Зотов С.М., Шаргородский В.Д. Принципы действия и использования беззапросных квантово-оптических систем для калибровки беззапросных радиотехнических измерительных средств. *Труды института прикладной астрономии РАН*, 2013, № 27, с. 26–33.
- [13] Марарескул Т.А., Гречкосеев А.К., Василенко А.В. Эксперимент по синхронизации бортовых шкал времени навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС по взаимным межспутниковым измерениям. *Радиотехника*, 2013, № 6, с. 18–21.

- [14] Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения. URL: <http://ftp.glonass-iac.ru> (дата обращения: 12.04.2021).
- [15] Система высокоточного определения эфемерид и временных поправок. URL: <http://www.glonass-svoevp.ru> (дата обращения: 12.04.2021).
- [16] GLONASS satellite ephemerides. URL: <http://www.igs.org/products-access/#glonass-satellite-ephemerides> (дата обращения: 12.04.2021).

References

- [1] Pecheritsa D.S., Burtsev S.Yu. [Calibration of GLONASS measuring ground station with parabolic antenna in constant error part of pseudorange measurements]. APEP-2018. *Tr. XIV Mezhd. nauch.-tekh. konf. T. 3* [APEIE-2018. Proc. Int. Sci.-Tech. Conf.]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2018, pp. 39–42. (In Russ.).
- [2] Grebennikov A.V., Kondrat'yev A.S., Kudrevich A.P., et al. Systematic delay calibration in radio navigation GNSS equipment providing spatial orientation. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Achievements of Modern Radioelectronics], 2013, no. 9, pp. 26–32. (In Russ.).
- [3] Fateev Yu.L., Dmitriev D.D., Konnov V.G. Calibration of measuring path for ECM test of navigation equipment of customers of satellite radio navigation systems. *Vestnik SibGAU*, 2012, no. 4, pp. 139–142. (In Russ.).
- [4] Kulichkova N.S., Kulichkov K.A., Grebennikov A.V. Results estimate instrumental delay determination unrequested range by signal GLONASS and GPS. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Achievements of Modern Radioelectronics], 2018, no. 12, pp. 54–57. (In Russ.).
- [5] Tupitsyn I.N., Zhiganov K.A., Zotov S.M. Technology and experimental calculations results for inter-channel biases ratio calibration of consumer's equipment. *Trudy instituta prikladnoy astronomii RAN* [Transactions of the Institute of Applied Astronomy RAS], 2013, no. 27, pp. 550–553. (In Russ.).
- [6] Pecheritsa D.S. Calibration of navigation equipment of GLONASS system users. *Al'manakh sovremennoy metrologii* [Al'manac of Modern Metrology], 2018, no. 15, pp. 164–171. (In Russ.).
- [7] Krat N.M., Ermolaev M.V., Marareskul D.I. Control of accuracy parameters of query-free measuring stations of the ground segment of GLONASS [Kontrol' tochnostnykh kharakteristik bezzaprosnykh izmeritel'nykh stantsiy iz sostava nazemnogo segmenta kosmicheskogo kompleksa sistemy GLONASS]. V: *Sistemy svyazi i radionavigatsii* [In: Communication and radio navigation systems]. Krasnoyarsk, Radiosvyaz' Publ., 2018, pp. 119–122. (In Russ.).
- [8] Zhukov A.N., Zotov S.M., Tupitsyn I.N. [Experimental processing results of calibration data computation for GLONASS radio-technical facilities using navigation system imitation]. *Metrologiya vremeni i prostranstva. Mater. VII Mezhd. simp.* [Methodology of Time and Space. Proc. VII Int. Symp.]. Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 2014, pp. 198–200. (In Russ.).
- [9] Pecheritsa D.S., Fedotov V.N. Calibration of simulators of the signals of global navigation satellite systems. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2018, no. 8, pp. 60–64, doi: <https://doi.org/10.32446/0368-1025it-2018-8-60-64> (in Russ.). (Eng. version: Meas. Tech., 2018, vol. 61, no. 8, pp. 824–830, doi: <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1509-z>)
- [10] Pecheritsa D.S. Metod kalibrovki imitatorov signalov sistemy GLONASS i zarubezhnykh kosmicheskikh navigatsionnykh system [Calibration method of signal imitation in GLONASS system of foreign global positioning system]. V: *Metrologiya v XXI veke* [In: Metrology in XXI century]. Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 2018, pp. 118–129. (In Russ.).
- [11] Pecheritsa D.S. *Metod kalibrovki navigatsionnoy apparatury potrebiteley GLONASS s ispol'zovaniem etalonov, proslezhivaemykh k gosudarstvennym pervichnym etalonam edinit velichin.* Diss. kand. tekhn. nauk [Calibration method for navigation equipment of GLONASS users with standard, traceable to state primary standards of measurements units. Kand. tech. sci. diss.]. Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 2018. (In Russ.).
- [12] Zhukov A.N., Zotov S.M., Shargorodskiy V.D. Working and application principle of query-free quantum optical systems for calibration of query-free radio technical measuring

- equipment. *Trudy instituta prikladnoy astronomii RAN* [Transactions of the Institute of Applied Astronomy RAS], 2013, no. 27, pp. 26–33. (In Russ.).
- [13] Marareskul T.A., Grechkoseev A.K., Vasilenko A.V. Experiment on onboard time synchronization of GLONASS navigation space vehicles via crosslink measurements. *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2013, no. 6, pp. 18–21. (In Russ.).
- [14] *Informatsionno-analiticheskiy tsentr koordinatno-vremennogo i navigatsionnogo obespecheniya* [Research and information center of time-coordinate navigation support]. URL: <http://ftp.glonass-iac.ru> (accessed: 12.04.2021). (In Russ.).
- [15] *Sistema vysokotochnogo opredeleniya efemerid i vremennykh popravok* [High-precision system for determination of ephemerides and time correction]. URL: <http://www.glonass-svoevp.ru> (accessed: 12.04.2021). (In Russ.).
- [16] *GLONASS satellite ephemerides*. URL: <http://www.igs.org/products-access/#glonass-satellite-ephemerides> (accessed: 12.04.2021).

Статья поступила в редакцию 26.05.2021

Информация об авторах

ГАНЖА Виктор Сергеевич — инженер второй категории отдела разработки баллистического и навигационного обеспечения космических аппаратов и космических систем. АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (662972, Железнодорожск, Красноярский край, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 52, e-mail: ganzhavs@iss-reshetnev.ru).

МАРАРЕСКУЛ Татьяна Александровна — кандидат технических наук, начальник сектора отдела разработки баллистического и навигационного обеспечения космических аппаратов и космических систем. АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (662972, Железнодорожск, Красноярский край, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 52, e-mail: mta@iss-reshetnev.ru).

МУРАТОВ Дмитрий Сергеевич — начальник группы отдела разработки баллистического и навигационного обеспечения космических аппаратов и космических систем. АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (662972, Железнодорожск, Красноярский край, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 52, e-mail: muratov@iss-reshetnev.ru).

Information about the authors

GANZHA Victor Sergeevich — Engineer of the second category, Department for the Development of Ballistic and Navigation Support for Spacecraft and Space Systems. ISS-Reshetnev Company (662972, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation, Lenin Street, Bldg. 52, e-mail: ganzhavs@iss-reshetnev.ru).

MARARESKUL Tatiana Alexandrovna — Candidate of Science (Eng.), Head of the Sector of the Department for the Development of Ballistic and Navigation Support for Spacecraft and Space Systems. ISS-Reshetnev Company (662972, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation, Lenin Street, Bldg. 52, e-mail: mta@iss-reshetnev.ru).

MURATOV Dmitry Sergeevich — Head of the Group of the Department for the Development of Ballistic and Navigation Support for Spacecraft and Space Systems. ISS-Reshetnev Company (662972, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation, Lenin Street, Bldg. 52, e-mail: muratov@iss-reshetnev.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ганжа В.С., Марарескул Т.А., Муратов Д.С. Калибровка бортовой аппаратуры измерения псевдодальности между космическими аппаратами для повышения точности определения расхождения их шкал времени. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 12, с. 100–106, doi: 10.18698/0536-1044-2021-12-100-106

Please cite this article in English as:

Ganzha V.S., Marareskul T.A., Muratov D.S. Calibration of Onboard Equipment for Measuring Pseudo-Range Between Spacecraft to Improve the Accuracy of Determining Their Time Scales Discrepancy. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 12, pp. 100–106, doi: 10.18698/0536-1044-2021-12-100-106