

Е. А. Карауш¹, Д. С. Печерица¹*

Перспективы применения Государственного первичного специального эталона координат ГЭТ 218-2022 для метрологического обеспечения высокоточной навигационной аппаратуры потребителя ГНСС

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических
и радиотехнических измерений, р.п. Менделеево,
Российская Федерация

* e-mail: khanykova_ea@vniiftri.ru

Аннотация. В работе представлены основные проблемы метрологического обеспечения высокоточной навигационной аппаратуры потребителя сигналов ГНСС. Обоснована необходимость актуализации номенклатуры перечня и значений характеристик высокоточных координатно-временных средств измерений, способов их калибровки, обеспечение прослеживаемости к Государственному первичному специальному эталону координат местоположения ГЭТ 218-2022. Разработаны способ калибровки высокоточной навигационной аппаратуры потребителя методом непосредственных сличений по сигналам ГНСС в части определения систематической погрешности измерения псевдодальности. Проведены исследования по оценке бюджета погрешности калибровки высокоточной навигационной аппаратуры потребителя с использованием эталонного источника навигационных сигналов, эталонного комплекта навигационной аппаратуры потребителя, метода обработки измерений по одновременно наблюдаемому навигационному космическому аппарату калибруемым средством измерений и эталонной аппаратурой. Результаты исследования также показали возможность наблюдения стабильности оценок систематической погрешности измерения псевдодальности для сигналов ГНСС в поддиапазонах L1, L2.

Ключевые слова: ГНСС, эталон координат, навигационная аппаратура потребителя, координатно-временные средства измерений

Е. А. Karaush¹, D. S. Pecheritsa¹*

The State primary special standard of position coordinates GET 218-2022 application prospects for metrological support of high-precision GNSS receivers

¹ Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo,
Russian Federation

* e-mail: khanykova_ea@vniiftri.ru

Abstract. The paper presents the main problems of metrological support of high precision navigation equipment of GNSS signals consumer. It substantiates the necessity of updating the nomenclature of the list and values of characteristics of high-precision coordinate-time measuring instruments, methods of their calibration, ensuring traceability to the State primary special standard of position coordinates of GET 218-2022. A method of calibration of high-precision user navigation equipment using direct comparisons with GNSS signals to determine the systematic error of pseudo-distance measurement was developed. The researches were made to estimate the calibration budget error of high-precision navigation equipment of the user with the reference source of navigation signals, reference

set of navigation equipment of the user and measurement processing method using simultaneously observed navigation spacecraft by the calibrated measurement means and the reference equipment. The results of the study also showed the possibility of observing the stability of estimates of the systematic error of pseudorange measurement for GNSS signals in the L1, L2 sub-bands.

Keywords: GNSS, coordinate standard, GNSS receiver, positioning, navigation, and timing

Введение

За последние десятилетия сфера применения глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) беспрецедентно расширилась от сегмента специальных пользователей (в области научных исследований, геодезических служб, функционирования наземного комплекса управления системой ГЛОНАСС и пр.) до сегмента массового рынка. Достижения в области вычислительных возможностей, снижения стоимости ресурсной базы создало благоприятные условия для производителей навигационной аппаратуры потребителя (НАП). Координатно-временные определения по сигналам ГНСС стали ключевым инструментом для многих сфер деятельности [1]. Это привело к новым и более строгим требованиям пользователей к средствам измерений с точки зрения метрологических и точностных характеристик.

Массовое внедрение новых образцов НАП привело к проблеме метрологического обеспечения прецизионных координатно-временных средств измерений, характеристики которых на уровне или выше характеристик рабочего эталона координат местоположения 1-го разряда [2]. Стоит отметить прогнозы специалистов о стремительном развитии ГНСС-технологий в следующем десятилетии [1,3,4].

Существующие условия и тенденции развития координатно-временных средств измерений [5] привели к необходимости создания государственного первичного эталона координат в целях проведения мероприятий по оценке и контролю характеристик прецизионных и перспективных НАП. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию № 2175 от 1 сентября 2022 г. был утвержден Государственный первичный специальный эталон координат местоположения ГЭТ 218-2022 [6].

Целью данного исследования является определение перспектив применения эталона координат ГЭТ 218-2022 в целях проведения испытаний прецизионных средств измерений, таких как высокоточные беззапросные измерительные системы, беззапросные радиотехнические измерительные средства, прецизионные НАП с режимом абсолютных/ относительных измерений.

Метрологическое обеспечение высокоточной НАП

В настоящее время для метрологического обеспечения высокоточной НАП необходимо внедрение решений для новых технологических задач:

- актуализация нормируемых метрологических характеристик высокоточной НАП (в том числе расширение номенклатуры принимаемых навигационных сигналов отечественной системы ГЛОНАСС [7-9] и сигналов зарубежных систем);

- проведение поверки и калибровки средств измерений с прослеживаемостью к Государственному первичному специальному эталону единицы длины ГЭТ 199-2018, Государственному первичному специальному эталону координат местоположения ГЭТ 218-2022;

- проведение периодической калибровки высокоточной НАП, пространственно-удаленной от эталонов на большие расстояния, без вывода из эксплуатации [10-13];

- калибровка высокоточной НАП с новыми видами антенных устройств [14] – адаптивная антенная решетка, направленная (параболическая) антенна;

- сокращение межкалибровочного интервала высокоточной НАП.

В соответствии с планом разработки (пересмотра) и утверждения государственных поверочных схем на 2023 г., ведутся работы в части решения перечисленных задач для координатно-временных средств измерений.

Ключевой метрологической характеристикой для высокоточных НАП является систематическая погрешность измерения беззапросной дальности по фазе дальномерного кода [15-17]. Проведение калибровки высокоточных НАП в части- оценки систематической погрешности измерений должно осуществляться с прослеживаемостью к эталону ГЭТ 218-2022 методом прямых измерений, методом непосредственных сличений по сигналам ГНСС.

Калибровка беззапросных измерительных станций БИС, комплексов геодезического мониторинга КГМ, унифицированных станций сбора измерений навигационных параметров УССИ выполняется прямым методом измерений с помощью эталонного имитатора сигналов ГНСС из состава ГЭТ 218-2022 [2]. Систематическая погрешность воспроизведения беззапросной дальности по фазе дальномерного кода эталонного имитатора сигналов ГНСС определена калибровкой с оцифровкой сигналов на рабочей частоте с суммарной неопределенностью 3 см [10].

Для метрологического обеспечения в части оценки систематической погрешности измерения псевдодальностей беззапросных радиотехнических измерительных средств с направленной антенной, адаптивной антенной решеткой и пространственно-разнесенных на большие расстояния БИС используется дифференциальная калибровка. Возимый эталонный комплект НАП из состава ГЭТ 218-2022 [2] позволяет осуществлять оценку погрешности измерения беззапросной псевдодальности с суммарной неопределенностью 6 см с размещением не более 10 км от калибруемого комплекса [11]. Также для дифференциальной калибровки высокоточной НАП используется сеть измерительных станций Росстандарта, размещенных в местах функционирования государственных эталонов времени и частоты (п. Менделеево, г. Новосибирск, г. Иркутск, г. Хабаровск, г. Петропавловск-Камчатский).

Необходимо отметить проблему калибровки беззапросных радиотехнических измерительных средств, размещенных в Антарктиде. Значительное удаление от национальных эталонов, сложность транспортировки средств измерений делает неэффективной калибровку методом прямых измерений. В связи с этим предлагается использовать дифференциальную калибровку по сигналам ГНСС.

Таким образом не требуется отключение калибруемого средства измерений, обеспечивается регулярность проведения периодической калибровки. Однако из-за особенности эксплуатации калибровки беззапросных радиотехнических измерительных средств в Антарктиде [18-19] требуется накопление навигационных наблюдений на интервале времени от 3 суток.

Результаты исследований

Для калибровки беззапросных радиотехнических измерительных средств исследовались оценки систематической погрешности псевдодальности.

1. Калибровка прямым методом измерений. Оценка систематической погрешности псевдодальности выполняется с помощью эталонного источника навигационных сигналов с привлечением опорного стандарта частоты (рабочий эталон времени и частоты первого разряда). Таким образом обеспечивается прослеживаемость к Государственному первичному эталону времени и частоты ГЭТ 1-2022. Неисключенная систематическая погрешность воспроизведения псевдодальности имитатора оценивается с помощью осциллографа из состава ГЭТ 218-2022. Таким образом бюджет неисключенной систематической погрешности воспроизведения псевдодальностей имитатором сигналов Θ рассчитывается как:

$$\Theta = K \cdot \sqrt{\Theta_{TD}^2 + \Theta_C^2 + \Theta_f^2 + \Theta_{temp}^2},$$

где K - коэффициент для расчета неисключенной систематической погрешности [20], Θ_{TD}^2 - погрешность измерения группового времени запаздывания в различных каналах осциллографа, Θ_f^2 - погрешность измерения временных интервалов осциллографом, Θ_C^2 - погрешность формы (отклонение положения фронта импульса модулирующей последовательности от расчетного значения), Θ_{temp}^2 - погрешность из-за температурного дрейфа задержки в радиочастотном тракте.

2. Калибровка методом непосредственных сличений по сигналам ГНСС. Такая калибровка высокоточной НАП предполагает использование реальных псевдодальномерных измерений в качестве исходной информации, а систематическую погрешность псевдодальности оценивать относительно станции сети Росстандарта или возимого эталонного комплекса НАП из состава ГЭТ 218-2022. Исследования результатов оценок систематической погрешности псевдодальности показали возможность наблюдения их стабильности на длительном интервале времени. На рис. 1 представлены результаты оценки стабильности систематической погрешности за период наблюдения 1 год для некоторых навигационных космических аппаратов системы ГЛОНАСС в поддиапазонах L1, L2.

Следует отметить, что для определенного круга потребителей подтверждение стабильности таких погрешностей имеет первостепенное значение. Также в целях проведения апробации данного метода были исследованы данный стан-

ций, размещенных в Антарктиде. В качестве результатов обработки измерений получены оценки шкалы времени исследуемых средств измерений. На рис. 2 представлена оценка смещения шкалы времени относительно системной шкалы станции Davis, включенной в сеть Международной службы ГНСС IGS (<https://network.igs.org/>).

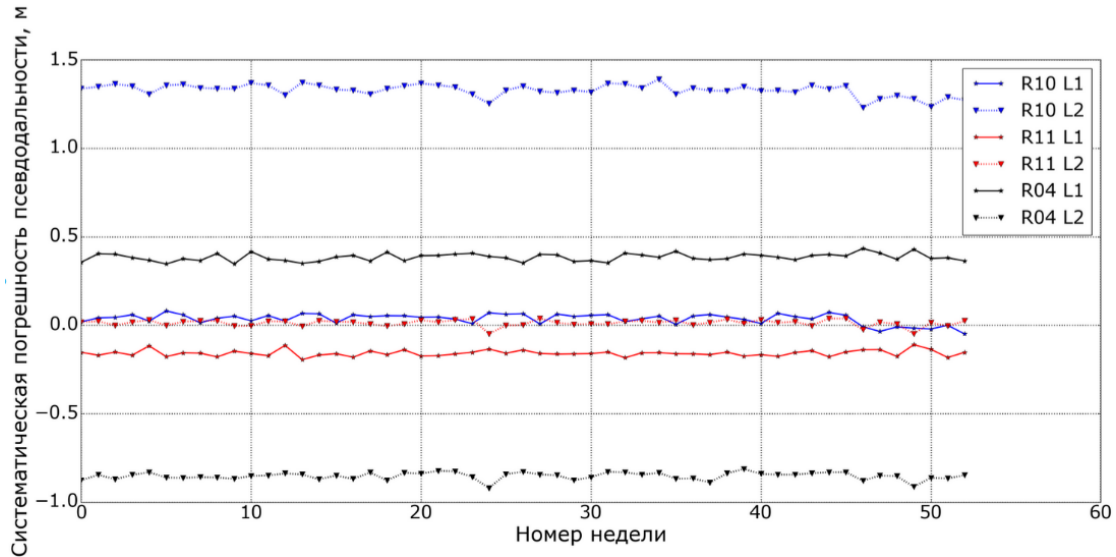


Рис 1. Результаты оценки стабильности систематической погрешности измерения псевдодальности по некоторым космическим аппаратам системы ГЛОНАСС на интервале наблюдений 1 год

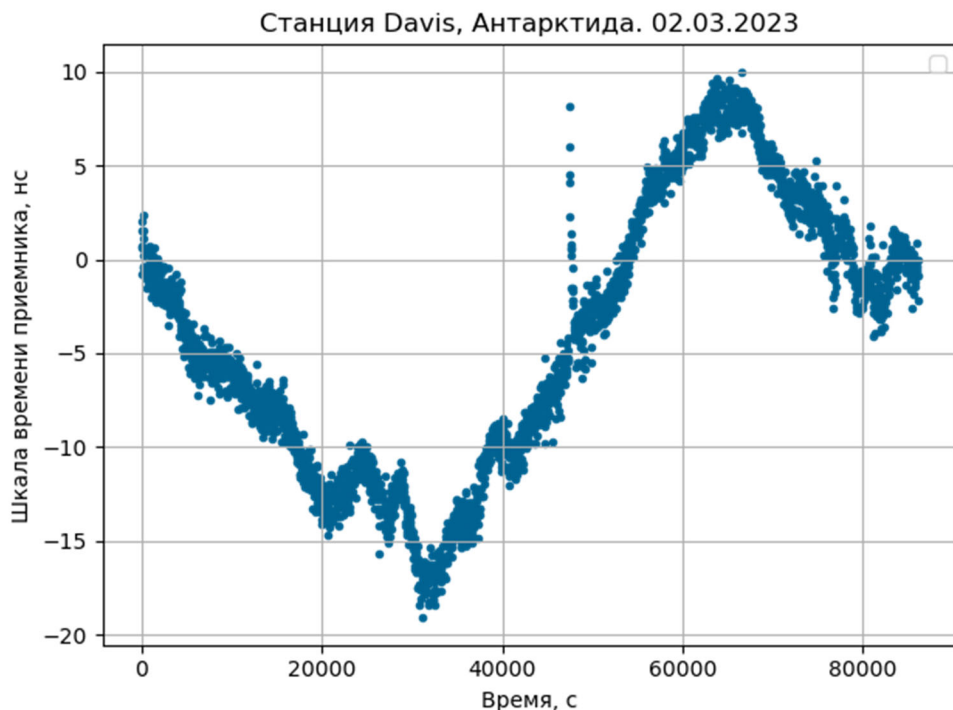


Рис. 2. Результат оценки смещения шкалы времени приемника станции Davis (Антарктида) относительно системной шкалы времени по сигналам ГЛОНАСС, GPS за 2 марта 2023 г. на суточном интервале наблюдений

Заключение

1. Утверждение Государственного первичного специального эталона координат местоположения ГЭТ 218-2022 обосновывает обновление в области метрологического обеспечения координатно-временных средств измерений, в частности высокоточной НАП.

2. Разработаны способы калибровки высокоточной НАП: метод прямых измерений, метод непосредственных сличений по сигналам ГНСС.

3. Проведены исследования по оценке бюджета погрешности разработанных способов калибровки высокоточной НАП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. GNSS User Technology: State-of-the-Art and Future. Egea-Roca D. [and et.] // IEEE Access. 2022, vol. 10, pp. 39939-39968.

2. Карауш Е.А., Печерица Д.С. Государственный первичный специальные эталон координат местоположения ГЭТ 218-2022: исследование метрологических характеристик // Измерительная техника. 2022. № 11. С. 3-8.

3. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, eds. Peter J.G. Teunissen, Oliver Montenbruck, Springer Cham, 2017, 1327 p.

4. GNSS User Technology Report. European GNSS Agency. 2020, Is. 3, 108 p.

5. Донченко С.И., Денисенко О.В., Федотов В.Н., Сильвестров И.С. 2021 год - начало нового этапа работ по метрологическому обеспечению системы ГЛОНАСС // Альманах современной метрологии. 2021. № 1 (25). С. 12-17.

6. Об утверждении Государственного первичного специального эталона координат местоположения. Приказ Росстандарта № 2175 от 01.09.2022.

7. Revnivukh I. GLONASS Programme Update // 11th ICG Meeting, November 2016, 14 p.

8. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2 (редакция 5.1). М: РНИИ КП, 2008. – 74 с.

9. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. Общее описание системы с кодовым разделением сигналов (редакция 1.0). М: АО «РКС», 2016. – 133 с.

10. Печерица Д.С. Калибровка навигационной аппаратуры потребителей ГЛОНАСС // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2019. Т.12. № 1. С. 126-131.

11. Karaush E.A., Pecheritsa D.S. Calibration of GNSS receiver with GLONASS signals // 2020 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering, PIERE 2020. 2020, pp. 175-179.

12. Толстиков А.С., Карауш А.А., Ханькова Е.А., Гаврилов А.Б. Калибровка пространственно-разнесенных стандартов частоты в составе беззапросных измерительных станций // Успехи современной радиоэлектроники. 2017, № 12. С. 36-38.

13. Карпик А.П., Сернов В.Г., Вдовин В.С. Система дифференциальной коррекции и мониторинга как основа перспективной национальной инфраструктуры навигации и позиционирования с повышенной точностью // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2019. Т. 4, № 2. С. 3-9.

14. Использованием многоэлементной антенной решетки для измерения параметров навигационных сигналов / Гребенников А.В. [и др.]. Успехи современной радиоэлектроники. 2019. № 12. С. 101-105.

15. Shi Chuang, Yi Wenting, Song Weiwei, Lou Yidong, Yao Yibin, Zhang Rui. GLONASS pseudorange inter-channel biases and their effects on combined GPS/GLONASS precise point positioning // GPS Solutions, 2013, vol. 17, pp. 439–451.

16. Исаев Ю.В., Подкорытов А.Н. Калибровка измерений псевдодальностей ГЛОНАСС совмещенного GPS/ГЛОНАСС-приемника для работы с поправками СДКМ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2019. Т. 6, № 3. С. 3-14.

17. Pecheritsa D.S. GLONASS receivers calibration in pseudorange biases / 14-th International Scientific-Technical conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE) // Proceedings. 2018. V. 1, pp. 255-258.

18. Liu B., King M., Dai W. Common mode error in Antarctic GPS coordinate time-series on its effect on bedrock-uplift estimates // Geophysical Journal International, 2018, Vol. 214, Is. 3, pp. 1652-1664.

19. Леконцев Д.А., Рубцов Н.С., Мельничук В.И. Экспериментальное исследование измерений беззапросных измерительных станций глобальных навигационных спутниковых систем // СПБНТОРЭС: Труды ежегодной НТК. 2021. № 1 (76). С. 47-49.

20. ГОСТ 8,381-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Способы выражения точности. М.: Стандартиформ. 2012 – 22 с.

© *Е. А. Карауш, Д. С. Печерица, 2023*