

УДК 621.317

СТАБИЛЬНОСТЬ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДЕРЖЕК КОДОВЫХ ГНСС-СИГНАЛОВ В ПРИЁМНОЙ АППАРАТУРЕ

А.А. Карауш

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
karaush_aa@vniiftri.ru

Аннотация. Постоянство величины задержек сигналов в приёмном тракте ГНСС-аппаратуры является критичным для задач сравнения шкал времени по каналу ГНСС. В настоящее время предполагается, что после проведения калибровки задержки сохраняют постоянное значение в пределах 2 нс или менее. Также считается, что для двух спутников ГЛОНАСС, излучающих сигнал на одной литерной частоте, эти задержки одинаковы. Целью исследования является количественная оценка нестабильности внутренних задержек в приёмниках, специально разработанных для сравнения времени и частоты.

Ключевые слова: кодовые ГНСС-сигналы, нестабильность внутренних задержек в приёмниках.

STABILITY OF SYSTEMATIC DELAYS OF CODE GNSS SIGNALS IN RECEIVING EQUIPMENT

А.А. Karaush

FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow region, Russia,
karaush_aa@vniiftri.ru

Annotation. The consistency of the signal delay value in the receiving path of the GNSS equipment is crucial for the tasks of comparing time scales over the GNSS channel. It is currently assumed that after calibration the delays keep constant value within the limits 2 ns or less. It is also believed that for two GLONASS satellites emitting a signal at the same letter frequency, these delays are the same. The aim of the study is a quantitative evaluation of the instability of internal delays in receivers specially designed for time and frequency comparisons.

Key words: coded GNSS signals, instability of internal delays in receivers.

Введение

В настоящее время после проведения относительной или абсолютной калибровки ГНСС-приёмников [1] предполагается, что задержки в приёмном тракте постоянны во времени в некоторых пределах. Назначенная нестабильность этих задержек входит в общую погрешность сравнения шкал времени (ШВ) эталонов времени и частоты по каналу ГНСС. ВРМ оценивает стабильность задержек между калибровками в величину около 2 нс. Однако перспективные требования к погрешности сравнения шкал времени эталонов находятся на уровне менее 1 нс, а значит, требуют более глубокого исследования вопроса

стабильности задержек и перспектив их калибровки. Наиболее точные из существующих методов сравнения ШВ через канал ГНСС основаны на использовании ионосферно-свободных комбинаций измерений, для которых вопрос стабильности задержек стоит особенно остро. Наибольшую чувствительность ионосферно-свободная комбинация (P3) имеет к задержке в сигнале P1, поскольку коэффициент пропорциональности для этого сигнала в комбинации приблизительно равен 2,54. Соответственно, изменение задержки в сигнале P1 на 0,4 нс приводит к смещению комбинации P3 на 1 нс.

Целью данного исследования является оценка разности межспутниковых задержек современных ГНСС-приёмников, используемых для передачи времени. Актуальность такого исследования возросла в последние годы с увеличением разнообразия приёмного ГНСС-оборудования, используемого в лабораториях времени для международных сличений.

Схема эксперимента

Для проведения эксперимента использовались пять специализированных временных приёмников. Четыре из них были подключены к одинаковым сигналам времени и частоты. SU31 был подключён к другим опорным сигналам. Измерения псевдодальностей проводились 1 раз в 30 секунд. Все приёмники расположены во ВНИИФТРИ в термостабилизированных помещениях, четыре из них расположены в одной комнате (кроме MYT2), расстояние между антеннами не превышает нескольких метров. Список приёмников с технической информацией и используемой антенной представлен в таблице.

Таблица

Информация об используемом оборудовании

Название	ГНСС-приёмник	Прошивка	Версия ПО GTR	Антенна	
SU03	GTR51 (TRE_G3TH)	3.7.2	1.6.4	NOV703GGG.R2	NONE
SU22	GTR51 (TRE_G3TH)	3.7.2	1.6.4	NOV703GGG.R2	NONE
SU04	GTR51 (TRE_G3TH)	3.7.6	1.8.3	JAVRINGANT_DM	NONE
SU31	GTR51 (TRE_G3TH)	3.7.2	1.5.0	LEIAR25.R4	LEIT
MYT2	GTR51 (TRE_G3TH)	3.7.6	1.8.3	NOV750.R4	NOVS

Оценивание разности задержек

Необходимо провести чёткую параметризацию задачи, поскольку задержки не наблюдаемы напрямую, а могут быть получены только в разностных измерениях двух приёмников. С достаточной для рассматриваемой задачи точностью кодовая псевдодальность для приёмника r , спутника s и сигнала k представляется [2] как:

$$D_{r,k}^s(t) = \rho_r^s(t) + c \left[dt_r(t) - dt^s(t) + B_{r,k}^s \right] + I_{r,k}^s(t) + T_r^s(t) + e_{r,k}^s(t), \quad (1)$$

где $D_{r,k}^s$ — псевдодальность; ρ_r^s — геометрическая дальность; dt_r — уход часов приёмника; dt^s — уход часов спутника; $B_{r,k}^s$ — аппаратная задержка сигнала; $I_{r,k}^s$ — ионосферная задержка; T_r^s — тропосферная задержка; $e_{r,k}^s$ — многопутность и шум измерений. Предполагается, что все члены уравнения (1), кроме задержки сигнала, являются функциями времени. Необходимо отметить, что $B_{r,k}^s$ — абсолютная задержка сигнала, которая является суммой задержек в приёмнике и спутнике. Первая разность псевдодальномерных измерений между двумя приёмниками a и b на короткой базовой линии представляется [3] в виде:

$$\Delta D_{ab,k}^s(t) = D_{a,k}^s(t) - D_{b,k}^s(t) = c \left(\Delta dt_{ab} + \Delta B_{ab,k}^s \right) + \Delta \rho_r^s(t) + \dot{\rho}^s(t) \cdot \Delta dt_{ab} + \Delta e_{ab,k}^s(t). \quad (2)$$

Здесь $\Delta \rho_r^s(t)$ — разность геометрической дальности; $\dot{\rho}^s(t)$ — скорость изменения дальности до спутника (она практически одинакова для двух близко расположенных приёмников). Влияние ионосферной и тропосферной рефракций также практически одинаково для близко расположенных приёмников, поэтому при формировании первой разности эти составляющие уравнения (1) сократились. Остались только разность шкал времени, разность внутренних задержек приёмников, поправка за счёт неодновременной фиксации измерений приёмниками и шум измерений. Для приёмников, которые подключены к одному внешнему источнику опорной частоты, разность их шкал времени — постоянная величина, не зависящая от времени. Также следует отметить, что $\Delta B_{ab,k}^s$ — это разность задержек в приёмных трактах приёмников, которая уже не содержит задержки сигнала в аппаратуре спутника, поскольку она одинакова для обоих приёмников.

Большинство приёмников были подключены к одним сигналам времени и частоты, задержка опорных сигналов была измерена заранее и компенсировалась ПО приёмника, следовательно, $\Delta dt_{ab}(t)$ для этих приёмников равно нулю. SU31 был подключён к сигналам водородного стандарта, и для его сравнения с другими приёмниками необходимо было вычислить величину $\Delta dt_{ab}(t)$. Для этого использовались данные автоматической измерительной системы из состава первичного эталона времени и частоты. В процессе обработки измерений для каждой пары приёмников рассчитывалась и применялась поправка за счёт неодновременности фиксации измерений, а также за счёт разности шкал времени (при необходимости). Для расчёта разности дальностей $\Delta \rho_r^s$ использовались координаты фазовых центров антенн, рассчитанные с помощью метода высокоточного позиционирования PPP.

Величина разности задержек $\Delta B_{ab,k}^s$ оценивалась как медиана по $\Delta D_{ab,k}^s(t)$ за полные сутки. Для спутников GPS и Galileo оценивалась единая задержка для всех спутников соответствующей ГНСС для каждого типа сигнала. Задержка для каждого спутника ГЛОНАСС и типа сигнала оценивалась индивидуально. Затем для спутников ГЛОНАСС, излучающих сигнал на одной литерной частоте, также были вычислены дифференциальные задержки:

$$\nabla \Delta B_{ab,k}^f = \Delta B_{ab,k}^{s1} - \Delta B_{ab,k}^{s2},$$

где f — номер частоты; $s1$ и $s2$ — спутники, излучающие сигнал на этой частоте. При калибровке считается, что задержки для спутников, излучающих на одной частоте, являются одинаковыми и, соответственно, $\nabla \Delta B_{ab,k}^f$ должен быть равен нулю для всех f .

Результаты

В ходе эксперимента была обработана измерительная информация для некоторых парных комбинаций приёмников из таблицы в виде кодовых и фазовых псевдодалностей, представленных в формате RINEX. Использовалась измерительная информация за полный год: с 1 января по 31 декабря 2020 года включительно. Сначала была проведена обработка по методу высокоточного позиционирования PPP для вычисления координат фазовых центров антенн приёмников. Затем за каждые сутки были рассчитаны разности задержек для всех сигналов и спутников GPS, Galileo и ГЛОНАСС.

На рис. 1 представлена годовая динамика разности внутренних задержек по сигналам GPS для пары приёмников (SU22 — SU03), в легенде для каждого типа сигналов указано математическое ожидание (МО) и среднеквадратическое отклонение (СКО). Данная пара представляет собой идеальный случай: приёмники относятся к одному типу, подключены с одними сигналами времени и частоты, находятся в одном помещении и оснащены одинаковыми антеннами. Видно, что разность задержек демонстрирует высокую стабильность, СКО на исходных сигналах составляет порядка 20–30 пс, для безыоносферной комбинации — 50 пс. Однако даже для этой пары в идеальных условиях разность задержек для сигналов ГЛОНАСС, представленная на рис. 2, не демонстрирует той же стабильности. Если СКО сигналов на второй частоте, как и в случае с GPS, составляет порядка 30 пс, то для первой частоты СКО составляет уже порядка 150 пс. Вследствие этого безыоносферная комбинация, которая, как было отмечено выше, имеет наибольшую чувствительность именно к задержкам на первой частоте, также имеет повышенное СКО порядка 400 пс.

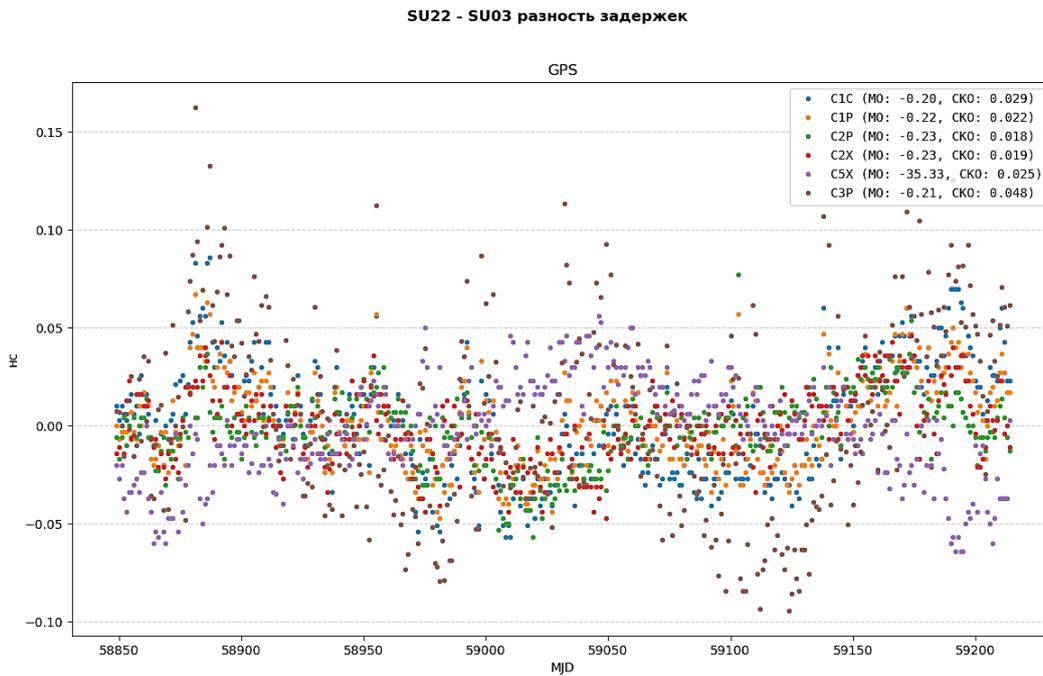


Рис. 1. Разность задержек пары приёмников (SU22 — SU03) для сигналов GPS

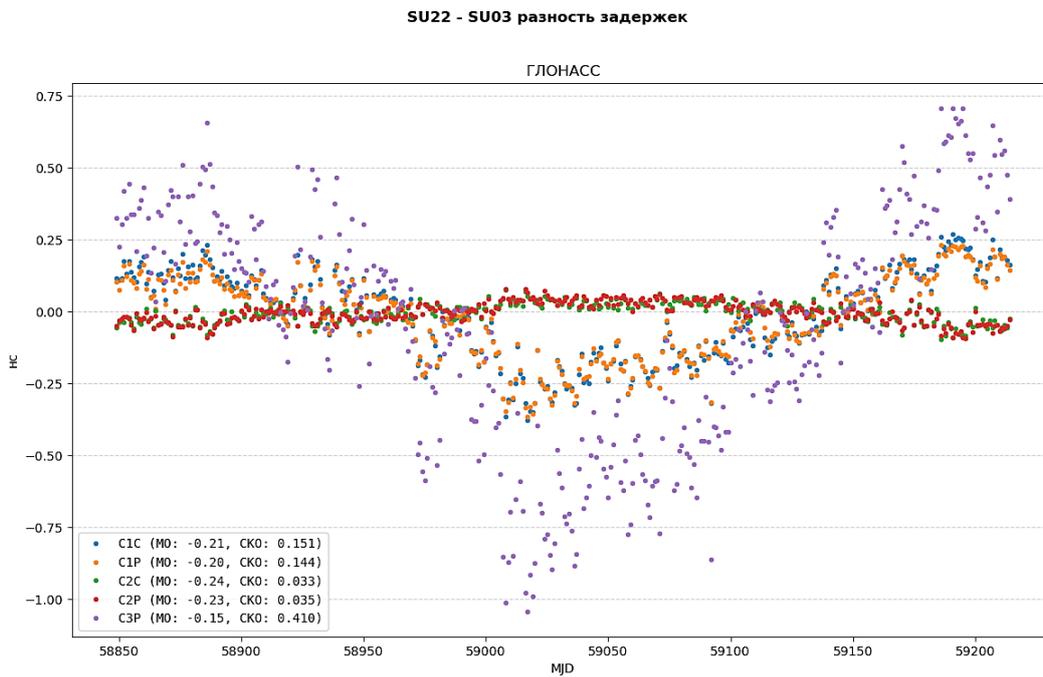


Рис. 2. Разность задержек пары приёмников (SU22 — SU03) для сигналов ГЛОНАСС

Особое внимание хотелось бы обратить на рассчитанные разности задержек для пары приёмников (SU03 — SU04). Единственным существенным отличием этих приёмников является то, что они подключены к разным антеннам. В остальном они идентичны: приёмные платы, опорные сигналы, расположение в одном помещении. Разница задержек пары приёмников (SU03 — SU04) для сигналов GPS и ГЛОНАСС представлена на рис. 3 и 4. Видно, что разброс значений для этой пары существенно выше. СКО разницы задержек безионосферной комбинации составляет порядка 0,5–0,6 нс, а размах в течение года достигает 2 нс. Это очень существенная величина для высокоточного сравнения времени. Видно, что задержки по всем сигналам имеют чётко выраженный сезонный характер. Это приводит к мысли о разной температурной зависимости задержки сигналов в приёмном тракте ГНСС-аппаратуры для разного типа антенн.

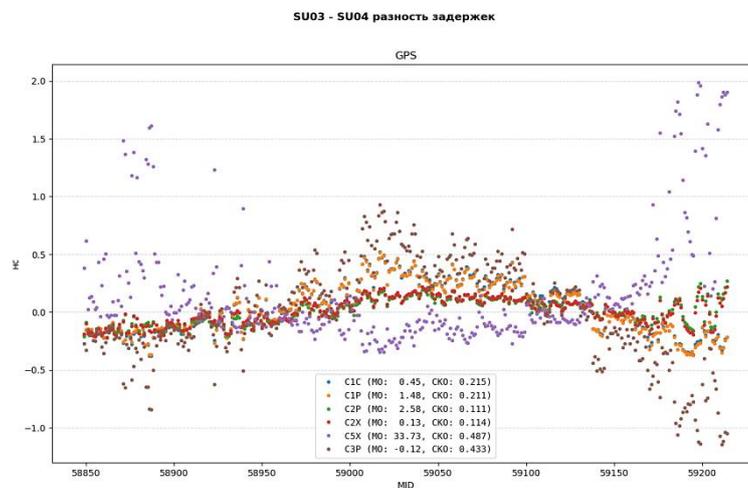


Рис. 3. Разность задержек пары приёмников (SU03 — SU04) для сигналов GPS

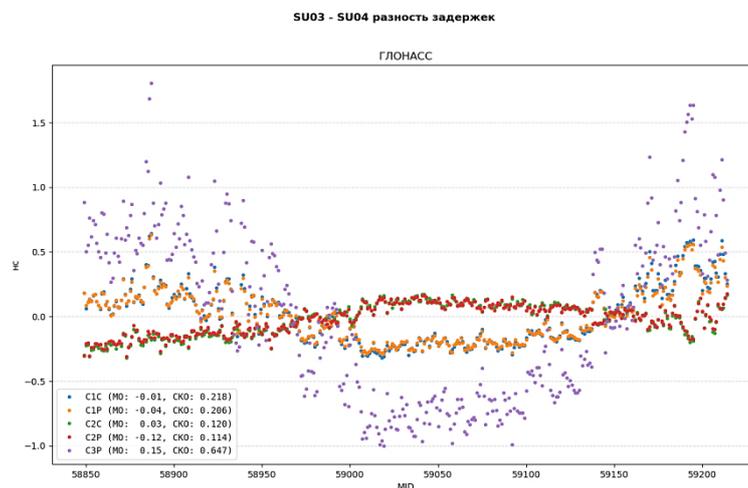


Рис. 4. Разность задержек пары приёмников (SU03 — SU04) для сигналов ГЛОНАСС

Также важным является вопрос одинаковости задержек для спутников ГЛОНАСС, излучающих сигнал на одной частоте, поскольку существующее ПО и сложившаяся практика калибровки предполагают равенство этих задержек. Ввод отдельных калибровочных значений для каждого спутника ГЛОНАСС не предусмотрен в широко используемой в настоящее время аппаратуре сравнения ШВ по сигналам ГНСС (в частности, GTR51). Исследование показало, что для большинства пар приёмников и типов сигналов действительно поддерживается равенство задержек сигналов спутников ГЛОНАСС, излучающих на одинаковой частоте. Однако для отдельных пар приёмников обнаружены существенные отклонения от данного предположения. Например, на рис. 5 изображены вторые разности задержек сигналов ГЛОНАСС C2P для пары приёмников (SU31 — MYT2). Для удобства восприятия на графике задержки сдвинуты на число наносекунд, равное номеру литерной частоты. Видно, что вторые разности задержек $\nabla\Delta B_{ab}^f$ для некоторых спутников в течение года систематически смещены от нуля, и это значение достаточно стабильно.

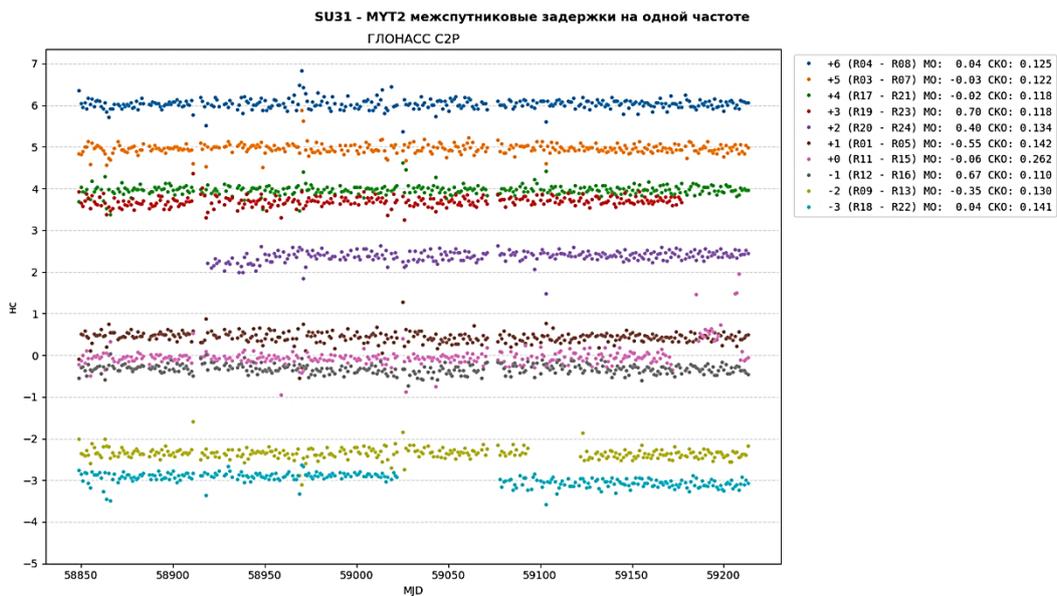


Рис. 5. Вторая разность задержек пары приёмников (SU31 — MYT2) для спутников ГЛОНАСС, излучающих сигнал на одной частоте

На рис. 6 представлена временная девиация (TDev) разности задержки безионосферной комбинации GPS в течение года для различных пар приёмников. Для большинства пар приёмников девиация сохраняет значение порядка 0,1 нс на интервалах усреднения до 30 суток. После 30 суток девиация

начинает расти, наиболее вероятным объяснением является изменение температуры окружающей среды в месте расположения антенн. Видно, что после 100 суток девиация продолжает расти для пар приёмников, оборудованных разными типами антенн: (SU03 — SU04); (SU03 — MYT2); (SU31 — SU03). Это вновь подтверждает гипотезу об отличии сезонных вариаций задержки у разных типов приёмных антенн.

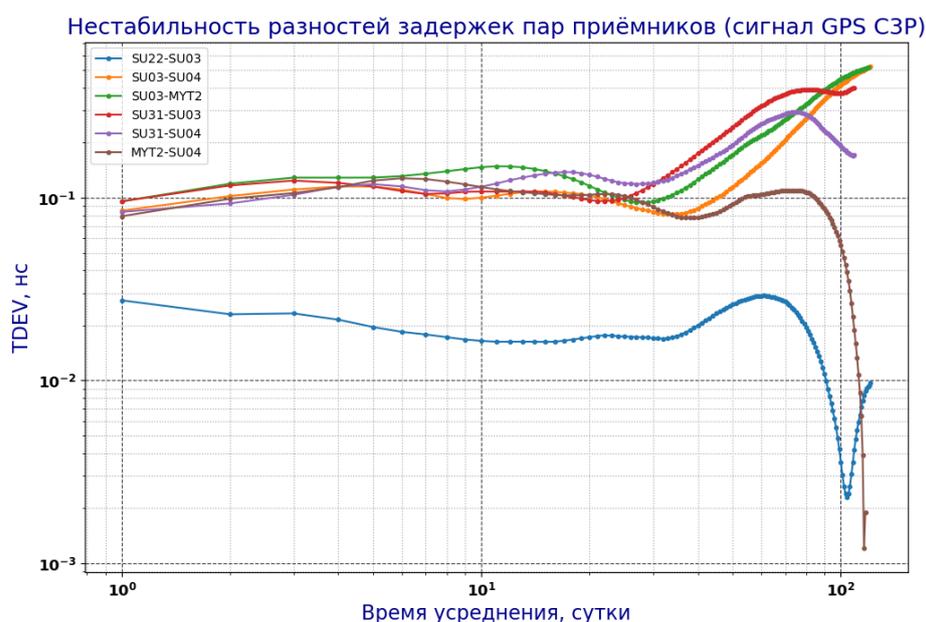


Рис. 5. Разность задержек пары приёмников (SU03 — SU04) для сигналов ГЛОНАСС

Выводы

В исследовании продемонстрирована нестабильность задержек кодового псевдодалномерного сигнала в различных ГНСС-приёмниках на протяжении календарного года. Особенно ярко вариации задержек проявляются для пар приёмников, оборудованных разными типами антенн. В эксперименте участвовали 5 приёмников геодезического класса, используемых для временных измерений. Сравнение кодовых псевдодалномерных измерений показало, что амплитуда разностных задержек сигналов безионосферной комбинации может достигать существенной для задачи сравнения времени величины: более 2 нс для пары приёмников SU03 и SU04. С повышением требований к точности сравнения удалённых шкал времени с помощью аппаратуры ГНСС вопрос стабильности задержек и их калибровки становится всё более актуальным. Выполненное исследование позволяет сделать предварительный вывод о неодинаковости температурной зависимости у различных

видов приёмных антенн. Даже при условии одинаковости используемого оборудования на местах расположения удалённых эталонов времени и частоты действует разная температура окружающей среды, что также может вносить дополнительные вариации в разность задержек, а следовательно, увеличивать погрешность сличения удалённых ШВ. Также требует дополнительного исследования вопрос неодинаковости задержек для двух спутников ГЛОНАСС, излучающих сигнал на одной частоте.

Предполагается, что основной вклад в нестабильность вносят изменения задержек в антенно-фидерном тракте из-за воздействия температуры. Разные типы антенн имеют разную чувствительность к температуре, кроме того, имеется зависимость от типа сигнала. Для достижения погрешности сравнения удалённых шкал времени через канал ГНСС на уровне менее 1 нс требуются дальнейшие исследования стабильности задержек в приёмниках. Возможно, при абсолютной калибровке антенн необходимо будет также оценивать температурную зависимость задержек для каждого типа сигнала.

Список литературы

1. Petit G. et al. BIPM Guidelines for GNSS equipment calibration. — BIPM Time Department, 2019. — 30 p.
2. Карауш А.А. Систематические межспутниковые задержки в ГНСС-приёмниках для сигналов КА GPS // Материалы VIII Научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке». — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2021. — С. 88–94.
3. Карауш А.А., Толстиков А.С., Ханыкова Е.А. Оценивание частоты пространственно разнесённых часов на основе фазовых ГНСС измерений // Успехи современной радиоэлектроники. — 2015. — № 10. — С. 82–84.

Статья поступила в редакцию: 08.10.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 19.10.2021 г.

Статья принята в работу: 22.10.2021 г.