

Оценка влияния частоты внешнего генератора на смещение относительных измерений по фазе несущей сигналов НКА ГЛОНАСС

© В. Б. Пудловский, Д. С. Печерица, А. А. Карауш
ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

Реферат

Адекватная интерпретация псевдофазовых измерений, полученных навигационной аппаратурой потребителей (НАП) или приёмником сигналов ГНСС разных фирм-производителей, является одним из необходимых условий успешной реализации различных режимов высокоточных относительных и/или абсолютных определений. Известно, что измерения по фазе несущей сигналов системы ГЛОНАСС в приемниках разных производителей могут иметь зависимость от номера литерной частоты. Однако вопрос о совпадении оценок текущего значения частоты опорного генератора (ОГ), полученных в НАП по сигналам ГНСС с кодовым (GPS) или по сигналам с частотным разделением (ГЛОНАСС), изучен недостаточно. Исходя из вышесказанного, цель работы следующая: исследовать, насколько одинаково изменяются в НАП приращения псевдофаз для сигналов НКА с частотным и кодовым разделением при изменении частоты ОГ приемника или внешнего ОГ.

Для достижения этой цели предложен метод оценки влияния опорной частоты навигационного приёмника на измерения псевдофаз несущей частоты сигналов ГНСС. Метод основан на обработке первых разностей измерений псевдофаз отдельно по сигналам каждого НКА. Оценка относительного смещения измерений псевдофаз отдельно по каждому из реальных сигналов НКА любой ГНСС может быть получена как первая разность измерений псевдофаз между двумя приёмниками, подключенными к общей антенне и к разным внешним высокостабильным ОГ. Измеряя разность внешних опорных частот этих приемников по сигналам ГНСС, можно оценить, насколько одинаково изменяются в НАП приращения псевдофаз для сигналов с частотным и кодовым разделением при относительном изменении частоты внешнего ОГ.

Для обработки первых разностей фазовых измерений по каждому НКА использованы результаты эксперимента с имитацией расхождения опорной частоты для одного из приемников сигналов ГНСС с помощью генератора отстроек частоты НРОГ-5. По результатам эксперимента установлено следующее:

- приращения псевдофаз для сигналов НКА с частотным и кодовым разделением при изменении частоты ОГ НАП изменяются одинаково;
- влияния номера литерной частоты НКА ГЛОНАСС на оценку разности частот внешних ОГ по измерениям псевдофаз не выявлено;
- полученные результаты справедливы для использованного при эксперименте типа НАП и требуют дополнительной проверки для приёмников других производителей.

Ключевые слова: ГНСС, фазовые измерения, ГЛОНАСС, навигационный сигнал.

Контакты для связи: Пудловский Владимир Борисович (pudlovskiy@vniiftri.ru).

Статья поступила в редакцию 16.12.2019, принята к публикации 13.02.2020, опубликована 12.05.2020.

Для цитирования: Пудловский В. Б., Печерица Д. С., Карауш А. А. Оценка влияния частоты внешнего генератора на смещение относительных измерений по фазе несущей сигналов НКА ГЛОНАСС // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 52. С. 40–45.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.52.40-45>

Estimation of the Influence of the External Generator Frequency on the Relative Phase Measurements of the GLONASS Signals

V. B. Pudlovskiy, D. S. Pecheritsa, A. A. Karaush

Federal State Unitary Enterprise “National Research Institute for Physical and Technical and Radio Engineering Measurements”, Mendeleevvo, Moscow region, Russia

Abstract

The correct interpretation of carrier phase measurements obtained with user navigation equipment or GNSS receivers from different manufacturers is one of the key conditions for the successful implementation of various modes of precise relative and / or absolute positioning. It is widely accepted that carrier phase measurements of the GLONASS satellite may depend upon its frequency channel and may be manufacturer-dependent. However, the issue of the agreement between reference oscillator frequency estimates obtained with the receiver by GNSS signals with code (GPS) and frequency division (GLONASS) has not been completely studied yet. To solve this problem, the goal of this work may be stated as: to investigate whether the carrier phase increments for GNSS signals with frequency and code division change equally in the receiver when the frequency of the reference oscillator changes.

To achieve this goal, a method is proposed for assessing the influence of the GNSS receiver reference frequency on the measurement of the GNSS signals carrier phase. The method is based on processing the single differences of carrier range measurements separately for each satellite. An estimate of the relative bias of phase measurements separately for each of the real signals of the satellite of any GNSS can be obtained as a single difference of carrier range measurements between two receivers connected to a common antenna and to different external high-stable oscillators. By measuring the difference in the external reference frequencies of these receivers using GNSS signals, it is possible to assess how much the carrier range increments for signals with frequency and code division change with a variation of the external oscillator relative frequencies.

The results of an experiment with simulated reference frequency change for one of the GNSS receivers using the HROG-5 frequency offset generator were used in processing the single-differences in carrier phase measurements for each satellite. According to the results of the experiment, the following was stated:

- increments of carrier phases for the signals of the spacecraft with frequency and code division change similarly when changing the frequency of the reference oscillator;
- the influence of the frequency channel of the GLONASS satellite on the estimate of the external reference frequency difference using the carrier phase measurements was not detected;
- the results obtained are valid for the type of GNSS receiver used in the experiment and require additional verification for receivers of other manufacturers.

Keywords: GNSS, phase measurements, GLONASS, navigation signals.

Contacts: Vladimir Pudlovskiy (pudlovskiy@vniiftri.ru).

Received December 16, 2019, accepted February 13, 2020, published May 12, 2020.

For citation: Pudlovskiy V. B., Pecheritsa D. S., Karaush A. A. Estimation of the effect of the external generator frequency on the relative phase measurements of the GLONASS signals // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 52. P. 40–45.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.52.40-45>

Введение

ГНСС позволяют с высокой точностью осуществлять решение задач КВНО. Технологии на основе измерений параметров сигналов ГНСС активно используются для решения задач геодезии, управления транспортными средствами, метрологии и в других отраслях. При этом современные требования потребителей по определению положения с сантиметровой точностью могут быть удовлетворены только с использованием измерений фазы несущей частоты сигналов ГНСС или псевдофазовых измерений.

Адекватная интерпретация псевдофазовых измерений, полученных навигационной аппаратурой потребителей (НАП) или приемником сигналов ГНСС разных фирм-производителей, является одним из необходимых условий успешной реализации различных режимов высоточных относительных измерений, а также высокоточного абсолютного местоопределения – PPP (англ. PPP – Precise Point Positioning) [1].

Известно, что измерения по фазе несущей частоты сигналов системы ГЛОНАСС в приемниках разных производителей могут иметь зависимость от номера литерной частоты [2, 3]. Поэтому влияние аппаратурных задержек в НАП при обработке сигналов ГЛОНАСС обсуждается исследователями до сих пор [2–6].

Аппаратурные задержки в измерениях псевдодальностей с использованием фазовой модуляции несущей сигналов ГНСС называют кодовыми, а аппаратурные задержки в измерениях псевдо-

фаз – фазовыми межлитерными задержками [2]. Для НАП известны два вида аппаратурных задержек, которые зависят от частоты принимаемого сигнала: межчастотные задержки (англ. Inter-frequency biases, IFB) и межлитерные задержки (англ. Interchannel biases, ICB). Межлитерные задержки вызваны частотным разделением сигналов в ГЛОНАСС, они существенно влияют на точность местоопределения в абсолютном режиме, а также на точность и период сходимости PPP [5].

В [2, 3, 5] утверждается, что при калибровке НАП для фазовых межлитерных задержек ГЛОНАСС с достаточно высокой точностью может использоваться линейная модель зависимости смещений от номера литерной частоты. Для кодовых межлитерных задержек явной зависимости от частоты не выявлено, их величины значительно больше фазовых, они стабильны во времени и могут достигать нескольких метров [5, 7].

В [4] показано, что кодовые межлитерные задержки ГЛОНАСС существенно зависят от версии программного обеспечения (прошивки) приемника, а также от типа используемой антенны. Для одинаковых приемников с однотипными прошивкой и антеннами кодовые межлитерные задержки ГЛОНАСС практически совпадают.

Для фазовых межлитерных задержек ГЛОНАСС в [3, 6] убедительно доказано, что смещения измерений псевдофаз в основном определяются особенностями обработки сигналов ГНСС в цифровом сигнальном процессоре конкретной модели НАП, возможными задержками между циф-

ровыми копиями сигнала дальномерного кода и сигнала от генератора несущей частоты.

Индукцированные цифровым сигнальным процессором межлитерные задержки не зависят от температуры, не меняются от приемника к приемнику и остаются стабильными во времени. В [3, 6] утверждается, что эти смещения могут быть получены непосредственно из микропрограммного обеспечения НАП и архитектуры цифровой микросхемы и, следовательно, могут быть скомпенсированы в абсолютном смысле.

Известно, что все сигналы в НАП (как цифровые, так и аналоговые) формируются, как правило, от одного общего встроенного опорного генератора (ОГ), имеющего обычно низкую долговременную стабильность по частоте [8]. Таким образом, отклонение частоты ОГ от номинала прямо влияет на измерения параметров сигналов ГНСС, прежде всего на оценку доплеровской частоты и измерения псевдофаз несущей частоты. Обычно это текущее смещение частоты ОГ оценивается при решении навигационной задачи в НАП вместе с определением составляющих вектора скорости потребителя [8].

Однако остается открытым вопрос о совпадении оценок текущего значения частоты ОГ, полученных в НАП по сигналам ГНСС с кодовым (GPS) или по сигналам с частотным разделением (ГЛОНАСС). С другой точки зрения этот вопрос можно сформулировать так: насколько одинаково изменяются измеренные приращения псевдофаз несущей на разных литерных частотах сигналов НКА ГЛОНАСС и для общей частоты сигналов GPS при изменении значения частоты ОГ.

Таким образом, задача данной работы состоит в том, чтобы исследовать, насколько одинаково изменяются в НАП приращения псевдофаз для сигналов НКА с частотным и кодовым разделением при изменении частоты опорного генератора приемника или внешнего ОГ.

Оценка приращения псевдофаз по отдельным сигналам ГНСС

Метод исследования

Оценка приращения псевдофаз отдельно по каждому из обрабатываемых сигналов ГНСС при изменении частоты ОГ может быть получена путем формирования первых разностей измерений псевдофаз, полученных одновременно двумя приемниками.

По этой причине выбран вариант использования общей антенны для двух комплектов НАП, т. н. «нулевая база». В данной конфигурации большинство составляющих ошибок в измерениях псевдофаз и псевдодальностей, обусловленные рефракцией в атмосфере ошибки и смещением шкалы времени НКА, будут общими для прием-

ников и, таким образом, компенсируются при формировании первых разностей для каждого сигнала от этого НКА. Источниками ошибок, которые остаются в первых разностях псевдофаз, являются относительная разница шкал времени приемников (ШВП), фазовые неоднозначности и, возможно, остатки многолучевого распространения в измерениях разных комплектов НАП.

Для достижения целей исследования оба приемника должны быть подключены к источникам внешней опорной частоты, обладающим высокой стабильностью частоты и разницей значений частот, известной с малой относительной погрешностью. Следует отметить, что подключение двух приемников к общему внешнему ОГ не может гарантировать компенсации относительного смещения шкал времени в этих комплектах НАП. Стабильность частоты внешнего ОГ может только улучшить дрейф ШВП в подключенных приемниках и не может обеспечить синхронизации ШВП как между приемниками, так и относительно внешней шкалы времени.

Таким образом, оценка относительного смещения измерений псевдофаз отдельно по каждому из реальных сигналов НКА любой ГНСС может быть получена как первая разность измерений псевдофаз между двумя приемниками, подключенными к общей антенне и к разным внешним высокостабильным ОГ. Измеряя разность внешних опорных частот, поступающих к приемникам сигналов ГНСС, можно оценить, насколько одинаково изменяются в НАП приращения псевдофаз для сигналов с частотным и кодовым разделением при относительном изменении частоты внешнего ОГ.

Описание эксперимента по реальным сигналам НКА

В мае 2018 г. в ФГУП «ВНИИФТРИ» был проведен эксперимент для исследования погрешности метода оценивания разности частот стандартов частоты с помощью измерений по фазе несущей частоты сигналов НКА ГНСС [9]. Функциональная схема эксперимента показана на рис. 1.

В процессе эксперимента осуществлялась имитация расхождения опорной частоты для одного из приемников сигналов ГНСС с помощью генератора отстроек частоты НРОГ-5.

Таким образом, в ходе эксперимента с помощью генератора НРОГ-5 между этими приемниками формировалась известная разница шкал времени, значение которой изменялось во времени, как показано на рис. 2.

Для оценки влияния опорной частоты приемника на измерения псевдофаз несущей сигналов ГНСС GPS и ГЛОНАСС осуществлена обработка первых разностей этих измерений отдельно по каждому из наблюдаемых сигналов НКА.

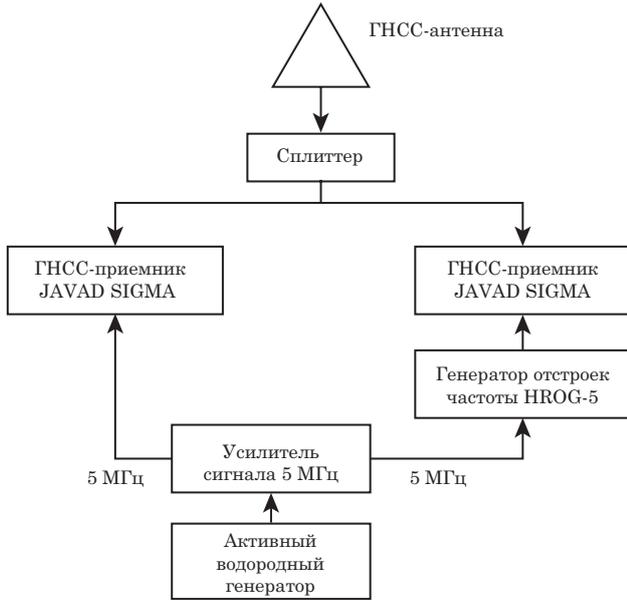


Рис. 1. Функциональная схема эксперимента

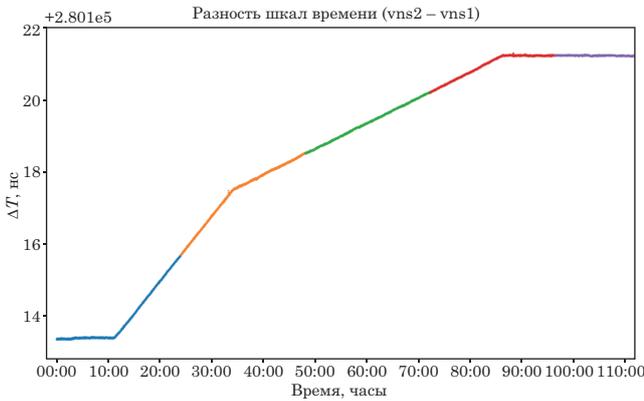


Рис. 2. Расхождение шкал времени в используемых приёмниках [9]

Интервал времени для анализа измерений разности шкал времени НАП τ был выбран с учетом максимального значения разности опорных частот, сформированных генератором HROG-5, и при условии проведения измерений на общем интервале времени по сигналам НКА ГЛОНАСС с максимальной разницей по частоте: литеры -7 и $+6$.

Обработка результатов измерений псевдофаз

Обработка первых разностей измерений псевдофаз отдельно по каждому НКА позволила оценить разность опорных частот приемников как член первого порядка линейного приближения расхождения ШВП или как разницу моментов измерений параметров общего навигационного сигнала.

Для оценки разницы шкал времени двух НАП по результатам измерений псевдодальностей и псевдофаз использовалось известное выражение [6], где все измерения выражены в метрах:

$$\begin{aligned} D_{i,A} - D_{i,B} &= L_{i,A} - L_{i,B} - (N_{i,A} - N_{i,B}) \cdot \lambda_i = \\ &= c \cdot \tau + f_{Di} \cdot \lambda_i \cdot \tau, \end{aligned} \quad (1)$$

где $D_{i,A}$, $D_{i,B}$ – измерения псевдодальностей по дальномерному коду i -го НКА на один момент времени в приемниках A и B соответственно; $L_{i,A}$, $L_{i,B}$ – измерения псевдофаз несущей частоты i -го НКА на один момент времени внутренней шкалы в приемниках A и B соответственно; $N_{i,A}$, $N_{i,B}$ – целое число циклов псевдофазы несущей частоты i -го НКА на один момент времени в приемниках A и B соответственно; f_{Di} – доплеровская частота несущей i -го НКА; λ_i – длина волны несущей i -го НКА; τ – разница шкал времени в момент приема сигнала i -го НКА приемниками A и B ; c – скорость света.

Для оценки значения τ на текущий момент t измерений двумя комплектами НАП выражение (1) следует преобразовать следующим образом:

$$\tau(t) = \frac{L_{i,A}(t) - L_{i,B}(t) - \Delta N_{i,AB}(t_0) \cdot \lambda_i}{c + f_{Di}(t) \cdot \lambda_i}, \quad (2)$$

где $\Delta N_{i,AB}(t_0) = \Delta N_{i,A}(t_0) - N_{i,B}(t_0)$ – разность целых циклов псевдофазы несущей частоты i -го НКА в приемниках A и B на начальный момент времени.

Для определения неизвестной разности фаз $\Delta N_{i,AB}(t_0)$ в начальный момент времени t_0 можно использовать измерения псевдодальностей, полученные в приемниках в этот же момент времени. Для повышения точности измерений псевдодальностей целесообразно выбрать момент траверза данного НКА, когда спутник имеет максимальный угол возвышения над горизонтом в течение суток и минимальное значение доплеровской частоты $f_{Di}(t_0) \approx 0$. Тогда оценка разности фаз $N_{i,AB}(t_0)$ в момент траверза i -го НКА может быть найдена с учетом (1) и (2) как

$$\Delta N_{i,AB}(t_0) = \frac{L_{i,A}(t_0) - L_{i,B}(t_0) - D_{i,A}(t_0) + D_{i,B}(t_0)}{\lambda_i}. \quad (3)$$

Очевидно, что использовать (3) необходимо для каждого НКА каждый раз после перезахвата сигналов или срыва слежения за фазой несущей частоты этого спутника.

Следует отметить, что несмотря на относительно низкую точность оценки $N_{i,AB}(t_0)$ в момент траверза за счет использования разности кодовых псевдодальностей, значение этой погрешности является фиксированной величиной для каждого НКА. Отсюда следует, что использование (3) снижает точность только абсолютной оценки $\tau(t)$ с помощью (1) по сигналам каждого i -го НКА. Однако изменение во времени оценки $\tau(t)$ по сигналам каждого i -го НКА уже не будет зависеть от погрешности оценки $N_{i,AB}(t_0)$.

Тогда, зная априорное значение разности частот внешних ОГ $\Delta F_{AB}(t)$ для приемников A и B , можно сравнить его с изменением во времени оценки $\tau(t)$ полученной отдельно по каждому i -му НКА, т. е. оценить точность выполнения следующего равенства:

$$\Delta F_{AB}(t) = \frac{\partial \hat{\tau}(\tau, L_{i,A}, L_{i,B})}{\partial t}, \quad (4)$$

где $\hat{\tau}(\tau, L_{i,A}, L_{i,B})$ – оценка $\tau(t)$, полученная только по текущим измерениям первой разности псевдофаз несущей частоты i -го НКА.

Для повышения точности оценки скорости изменения $\tau(t)$ очевидным представляется увеличение интервала наблюдений данного НКА до максимального значения, определяемого условиями совместной видимости нескольких НКА. Полученные на данном периоде наблюдения НКА измерения псевдофаз являются исходными данными для оценки относительной разности частот ОГ для этих двух приёмников. Эта оценка ΔF_{AB} для всего интервала измерений определяется как член первого порядка линейного приближения для всего массива значений разницы ШВП $\tau(t)$, полученных на этом интервале в каждую эпоху измерений с использованием (2) отдельно для каждого выбранного НКА.

Выполнение равенства (4) для сигналов ГНСС как с частотным, так и с кодовым разделением будет свидетельствовать о корректном измерении псевдофаз несущей каждого НКА с помощью НАП выбранного типа при отклонении частоты внешнего ОГ от номинального значения.

Результаты

Для обработки в соответствии с (2) и (4) были использованы файлы измерений в формате RINEX v.3.03 с дискретностью 30 с, полученные от двух НАП типа SIGMA-3 (компания JAVAD) в период проведения эксперимента [9]. Для последующего анализа выбран интервал времени в течение суток 22.05.2018 г., когда генератора HROG-5 формировал максимальную относительную отстройку по частоте $5 \cdot 10^{-14}$ от номинала 5 МГц для приёмников, подключенных к общей антенне.

Оба комплекта НАП одновременно проводили измерения псевдодальностей и псевдофаз по сигналам ГНСС GPS и ГЛОНАСС. Для дальнейшей обработки в течение суток 22.05.2018 г. были отобраны измерения трёх НКА ГЛОНАСС с системными номерами (по формату RINEX) R08 (литер +6), R11 (литер 0), R10 (литер –7) и два НКА GPS с системными номерами G07 и G09.

На рис. 3 представлены изменения абсолютных значений оценки разности ШВП $\tau(t)$, полученные отдельно по каждому из выбранных НКА на протяжении общего периода наблюдения этих сигналов. Как и ожидалось, абсолютные значения полученных оценок отличаются для разных НКА прежде всего из-за грубой оценки начальной разности фаз между приёмниками. Однако приращения оценок $\tau(t)$, полученные независимо по измерениям разных НКА, совпадают по величине на

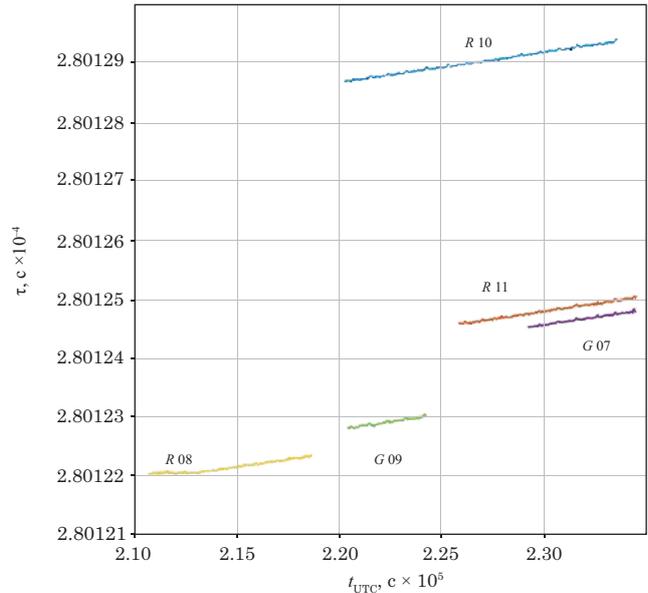


Рис. 3. Оценка разности шкал приемников по результатам обработки первых разностей измерений псевдофаз несущей частоты сигналов GPS и ГЛОНАСС

одинаковых интервалах времени этого общего периода наблюдений.

Для более детального анализа влияния номера литерной частоты ГЛОНАСС, полученные оценки $\tau(t)$ преобразованы в относительные значения и смещены по оси времени. В качестве опорного значения (условный «0») выбрана оценка разности ШВП для момента траверса каждого НКА. Полученные относительные смещения ШВП только для НКА ГЛОНАСС представлены на рис. 4. Как легко видеть из анализа представленных графиков, характер изменения разности ШВП не зависит от номера литерной частоты сигналов ГЛОНАСС.

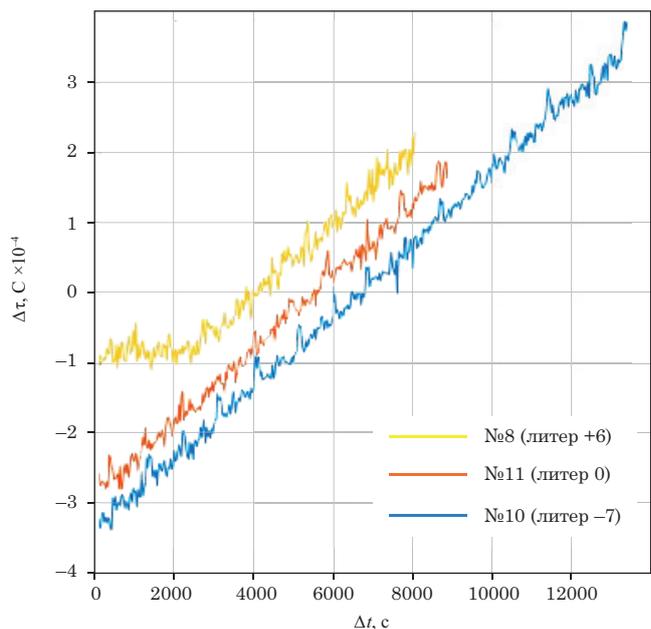


Рис. 4. Сравнение трендов первой разности измерений по фазе несущей частоты НКА ГЛОНАСС: №8, №11, №10

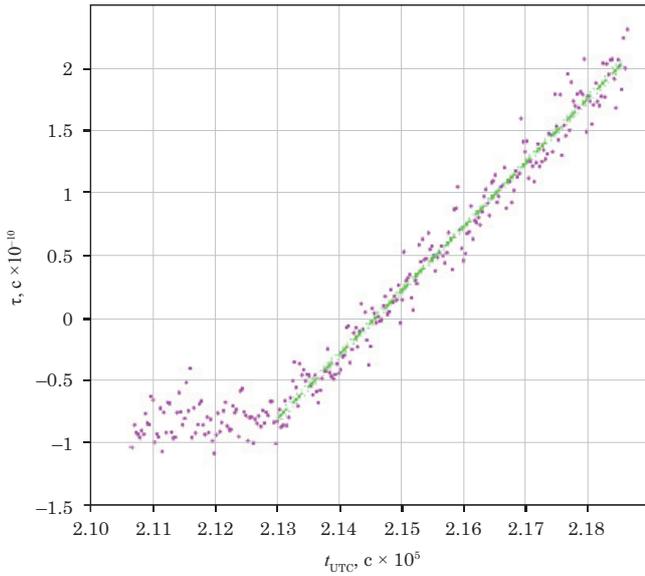


Рис. 5. Оценка разницы частот как линейного тренда (пунктир) первой разности измерений по фазе несущей частоты НКА ГЛОНАСС №8 (литер +6)

На рис. 5 более детально показано изменение оценок $\tau(t)$ относительно значения в момент траверса одного из НКА ГЛОНАСС (№8 (литер +6)), но в шкале абсолютного времени UTC. На этом рисунке хорошо заметен момент начала изменения частоты внешнего ОГ (около 213000 с) для одного из комплектов НАП.

Итоговые значения полученных оценок разности опорных частот двух комплектов НАП, полученные по результатам обработки измерений псевдофаз отдельно по сигналам каждого НКА, а также доверительный интервал этих оценок, представлены в табл. 1. Следует напомнить, что на данном интервале времени эксперимента генератор HROG-5 формировал для приёмников максимальную относительную отстройку по частоте $5 \cdot 10^{-14}$ от номинала 5 МГц.

Таблица 1

Оценка разности опорных частот для двух НАП по сигналам разных НКА при отстройке HROG-5 на $5 \cdot 10^{-14}$

НКА (литер)	Интервал линейного приближения, с	Оценка относительной разности частот $(\Delta F/F) \times 10^{-14}$	Доверительный интервал оценки по уровню 0.95×10^{-14}	
R10(-7)	13380	5.022	5.079	5.143
R11(0)	8880	5.208	5.152	5.264
R08(+6)	5610	5.127	5.003	5.250
G07	5310	5.169	5.053	5.286
G09	3900	5.286	5.052	5.519

Заключение

Представлен метод оценки влияния опорной частоты навигационного приёмника на измерения псевдофаз несущей частоты сигналов ГНСС. Метод основан на обработке первых разностей измерений псевдофаз отдельно по сигналам каждого НКА. По результатам эксперимента установлено следующее:

- приращения псевдофаз для сигналов НКА с частотным и кодовым разделением при изменении частоты опорного генератора НАП изменяются одинаково;
- влияния номера литерной частоты НКА ГЛОНАСС на оценку разности частот внешних опорных генераторов по измерениям псевдофаз не выявлено;
- полученные результаты справедливы для использованного при эксперименте типа НАП; но для НАП других производителей результаты могут быть иными, что требует дополнительной проверки.

Литература

1. Поваляев А. А., Подкорытов А. Н. Высокоточное местопределение в глобальных навигационных спутниковых системах в абсолютном режиме за счет разрешения неоднозначности псевдофазовых измерений // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60, № 8. С. 813–824.
2. Wanninger L. Carrier-phase inter-frequency biases of GLONASS receivers // J. Geod. 2012. Vol. 86(2). P. 139–148.
3. Sleewaegen J. M., Simsky A., de Wilde W. et al. Demytifying GLONASS inter-frequency carrier phase biases // Inside GNSS. 2012. Vol. 7(3). P. 57–61.
4. Shi Chuang, Yi Wenting, Song Weiwei et al. GLONASS pseudorange inter-channel biases and their effects on combined GPS/GLONASS precise point positioning // GPS Solutions. 2013. Vol. 17. P. 439–451.
5. Yamanda H., Takasu T., Kubo N. et al. A. Evaluation and calibration of receiver inter-channel biases for RTK-GPS/GLONASS. In: proceedings of ION GNSS2010. Institute of Navigation, Portland, Oregon, 2010. P. 1580–1587.
6. Defraigne P., Sleewagen J.-M., Matsakis D. How important is it to synchronize the code and phase measurements of GNSS receiver? [Electronic resource]. URL: <http://www.insidegnss.com/auto/novdec15-SOLUTIONS.pdf> (дата обращения: 28.02.2019).
7. Печерица Д. С. Метод калибровки навигационной аппаратуры потребителей ГЛОНАСС с использованием эталонов, прослеживаемых к государственным первичным эталонам единиц величин: дис. канд. техн. наук: 05.11.15. ФГУП «ВНИИФТРИ». Менделеево, 2018. 123 с.
8. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
9. Карауш А. А., Смирнов Ф. Р. Оценка нестабильности опорной частоты по результатам фазовых измерений приёмника сигналов ГНСС // IX Международный симпозиум «Метрология времени и пространства». Менделеево Московской области, 12–14 сентября 2018 г. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2018.