

**СРАВНЕНИЕ ШКАЛ ВРЕМЕНИ МЕТОДОМ PPP  
ПО ИЗМЕРЕНИЯМ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ  
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС**

В.В. Митрикас<sup>1</sup>

Д.С. Печерица<sup>2</sup>

И.О. Скакун<sup>1</sup>

В.Н. Федотов<sup>2</sup>

mvv@glonass-iac.ru

pecheritsa\_ds@vniiftri.ru

ivan.skakun@glonass-iac.ru

fedotov@vniiftri.ru

<sup>1</sup> ЦНИИмаш, г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация

<sup>2</sup> ВНИИФТРИ, г.п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация

---

**Аннотация**

Рассмотрено применение метода PPP для высокоточного сравнения частот и шкал времени опорных генераторов по измерениям навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС. Приведены результаты экспериментальных исследований сравнения шкал времени опорных генераторов методом PPP, обнаружен эффект систематического смещения разности частот генераторов, вычисленной по полученным разностям шкал времени. Показано, что рассинхронизация кодовых и фазовых измерений объясняет полученное смещение. Отмечено, что значение рассинхронизации кодовых и фазовых измерений может меняться при перезагрузке приемника. Приведены результаты сравнения шкал времени, полученные дифференциальным методом с учетом целочисленного свойства параметров фазовой неоднозначности навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС

**Ключевые слова**

ГЛОНАСС, ГНСС, эталон времени, метод PPP, фазовая неоднозначность, время и частота

Поступила в редакцию 22.06.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

---

**Введение.** В последние годы метод PPP (Precise Point Positioning) [1] активно применяется для решения частотно-временных задач. Он обеспечивает случайную погрешность сравнения шкал времени на уровне десятков пикосекунд на непрерывном интервале решения и контроль нестабильности генератора на уровне  $(5...8) \cdot 10^{-16}$  для суточного интервала усреднения. Систематическая погрешность сравнения шкал времени определяется калибровкой навигационной аппаратуры (навигационного приемника, антенны, антенного кабеля) [2, 3], которая, как правило, выполняется на базе метрологических институтов и на следующем этапе с точностью одной наносекунды [4].

Зачастую в программных реализациях метода PPP используются измерения, полученные либо комбинированным созвездием навигационный космический аппарат (НКА) GPS и ГЛОНАСС, либо только НКА GPS, в то время как вопрос использования в обработке измерений, выполненных только НКА ГЛОНАСС, остается недостаточно исследованным. Основная цель настоящей работы —

оценка погрешности сравнения частот и шкал времени методом PPP по измерениям только НКА ГЛОНАСС.

В большинстве случаев для решения частотно-временных задач используются специальные навигационные приемники, которые обеспечивают формирование измерений в шкале времени опорного генератора, называемые временными. Из современных приемников к временным часто относят PolaRX4 PRO (Septentrio), TTS-4 (PikTime) и GTR51 (MESIT). Последние получили наиболее широкое распространение в России.

Для оценки погрешности сравнения частот и шкал времени методом PPP по измерениям НКА ГЛОНАСС было проведено два эксперимента: на нулевой и на малой базовых линиях. В обоих экспериментах обнаружен эффект систематического смещения оценки разности частот опорных генераторов. Показано, что данный эффект можно объяснить рассинхронизацией кодовых и фазовых измерений одного или обоих приемников. Эффект аналогичен рассмотренному в работе [5] для НКА GPS. Отмечено, что значение рассинхронизации меняется при перезагрузке приемника. Получена оценка погрешности сравнения частот и шкал времени при условии устранения рассинхронизации измерений.

**Технология обработки.** Сравнение шкал времени с использованием метода PPP подразумевает наличие двух этапов обработки измерений текущих навигационных параметров: сетевого и потребительского. Сетевой этап выполняется на стороне провайдера высокоточной эфемеридно-временной информации (ЭВИ) и заключается в уточнении высокоточных орбит и поправок часов НКА по измерениям сети станций. Потребительский этап заключается в обработке измерений двух навигационных приемников методом PPP с последующим вычитанием полученных результатов.

Как правило, для уточнения ЭВИ используются измерения глобальной сети станций, например международной службы ГНСС IGS (International GNSS Service, *англ.*) [6], которые доступны в виде RINEX-файлов и могут быть загружены с общедоступных ftp-серверов. В основе решения задачи уточнения ЭВИ лежит формирование и решение системы линейных уравнений, в которой учитывается множество эффектов [7], в частности несферичность гравитационного поля Земли, притяжение третьих тел Солнечной системы, приливные эффекты в твердом теле Земли, океанические приливы, полюсной прилив, ряд релятивистских эффектов, световое давление, реактивная тяга и ряд других более мелких эффектов. При использовании глобальной сети даже на двухсуточном интервале обработки число уточняемых параметров может превышать 100 тыс. Решение сформированной системы выполняется методом наименьших квадратов. Точность получаемого при таком подходе решения может достигать первых единиц сантиметров, что подтверждается как внутренней сходимостью орбиты и погрешностью определения координат приемников, не входящих в сеть станций, по которой выполнялось решение, так и анализом невязок лазерных измерений [8]. Служба IGS ежедневно проводит оценку точности орбит всех центров анализа.

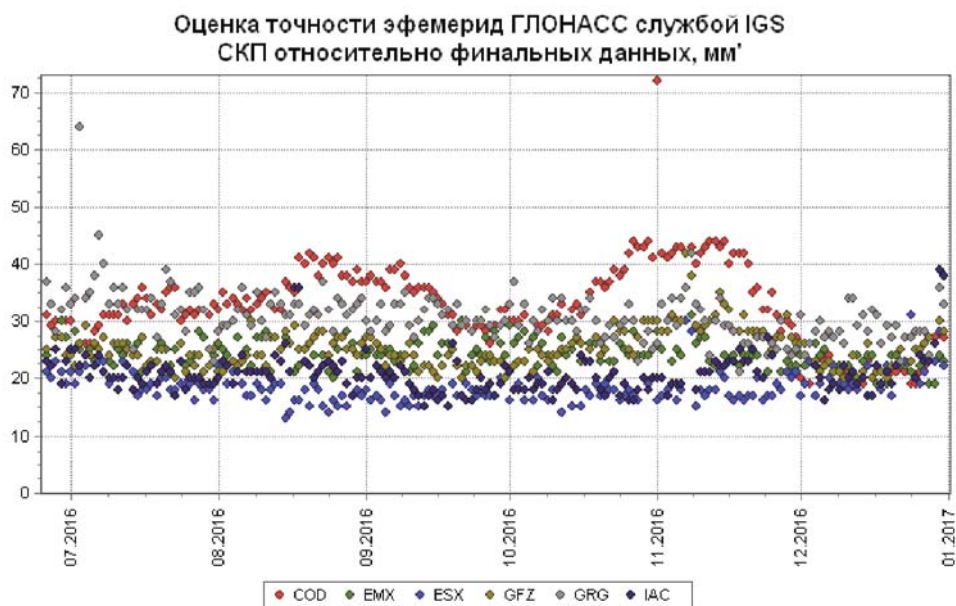


Рис. 1. Результаты оценки службой IGS точности орбит НКА ГЛОНАСС различных центров анализа IGS

Пример полученных оценок орбит НКА ГЛОНАСС на полугодовом интервале приведен на рис. 1. В настоящей работе для метода PPP используется ЭВИ с шагом, равным 30 с (IAC, см. рис. 1), посчитанная в ЦНИИмаш.

При реализации метода PPP принята следующая модель измерений псевдодальности  $P_{GS,i}^{SC}$  и псевдофазы  $L_{GS,i}^{SC}$  для заданной пары спутник–приемник (GS–SC) на исходных частотах:

$$P_{GS,i}^{SC} = \rho_{GS}^{SC} + T_{GS}^{SC} + I_{GS,i}^{SC} + cdt_{GS} - cdt_i^{SC} + \epsilon_{GS,P_i}^{SC};$$

$$L_{GS,i}^{SC} = \rho_{GS}^{SC} + T_{GS}^{SC} - I_{GS,i}^{SC} + cdt_{GS} - cdt_i^{SC} + \lambda_i^{SC} N_{GS,i}^{SC} + \Delta\rho_{GS,windup,L_i}^{SC} + \Phi_{0,GS,L_i} + \epsilon_{GS,L_i}^{SC};$$

$$\lambda_i^{SC} = \frac{c}{f_i^{SC}},$$

где  $\rho_{GS}^{SC}$  — геометрическая дальность с учетом вариаций фазовых центров приемной и излучающих антенн, приливных деформаций в теле Земли и гравитационной задержки;  $T_{GS}^{SC}$  — тропосферная задержка распространения сигнала между спутником SC и приемником GS;  $I_{GS,i}^{SC}$  — ионосферная задержка распространения сигнала между спутником SC и приемником GS;  $cdt_{GS}$  — смещение показаний часов навигационного приемника GS относительно показаний часов системы;  $cdt_i^{SC}$  — смещение показаний часов спутника SC относительно показаний часов системы с учетом релятивистской поправки, обусловленной эллиптичностью орбиты НКА;  $\Delta\rho_{GS,windup,L_i}^{SC}$  — систематическое смещение измерений псевдофазы спутника SC, связанное со взаимной ориентацией антенн спутника

и навигационного приемника;  $f_i^{SC}$  — частота несущего колебания спутника SC с учетом литейной зависимости для НКА ГЛОНАСС;  $\varphi_{0,GS,L_i}$  — фаза начального колебания генератора приемника GS;  $\epsilon_{GS,P_i}^{SC}, \epsilon_{GS,L_i}^{SC}$  — погрешность измерений псевдодальности и псевдофазы спутника SC в навигационном приемнике GS;  $i$  — несущая частота.

В основе метода PPP так же, как и для сетевого решения, лежит формирование и решение системы линейных уравнений, составленных из безыоносферных комбинаций кодовых и фазовых измерений. В состав уточняемых параметров входят координаты приемника, поправки его часов, тропосферная задержка и параметры фазовой неоднозначности. В используемой реализации метода PPP параметры фазовой неоднозначности уточняются в области действительных чисел. Решение сформированной системы выполняется методом наименьших квадратов. Точность уточнения координат в подобном решении находится на уровне единиц сантиметров.

**Результаты обработки.** Для экспериментального исследования достижимой точности сравнения частот и шкал времени методом PPP по измерениям НКА ГЛОНАСС было проведено два эксперимента. Первый — на нулевой, второй — на малой базовой линии.

В рамках каждого эксперимента выполнена обработка измерений двух навигационных приемников методом PPP и методом Common View с учетом целочисленного свойства неоднозначностей (Integer CV) [9]. Для получения оценки разности шкал времени методом PPP проводилась независимая обработка измерений НКА ГЛОНАСС обоих навигационных приемников на суточных интервалах. Полученные оценки поправок внутренних шкал времени приемников (относительно системной шкалы времени ГНСС) вычитались друг из друга для нахождения оценки относительного хода сравниваемых шкал. Для получения оценки разности шкал времени методом Integer CV проводилась совместная обработка измерений НКА ГЛОНАСС обоих навигационных приемников на всем интервале измерений.

В первом эксперименте два приемника GTR51 (Model TRE\_G3TH; Board Version TRE\_G3TH\_8; Board Firmware Version 3.5.13 May, 18, 2016) BIG<sub>1</sub> и BIG<sub>2</sub> были установлены на территории ВНИИФТРИ и сопряжены с общей Large Impedance Ground Plane антенной с эффектом подавления многолучевости [10] и общим активным водородным генератором. Измерения обрабатывались в течение 14 суток (2016-12-27 00:00:00–2017-01-10 00:00:00).

На рис. 2 приведены полученные результаты оценки разности шкал времени приемников на интервале 2016-12-30 00:00:00–2017-01-10 00:00:00 методами Integer CV (синие точки) и PPP (зеленые точки). Для наглядности на графике результаты метода Integer CV были смещены на 135 пс (средние значения результатов методов совпадают).

В решении методом PPP по измерениям НКА ГЛОНАСС (см. рис. 2, каждому суточному интервалу соответствует ярко выраженный наклон, отражаю-

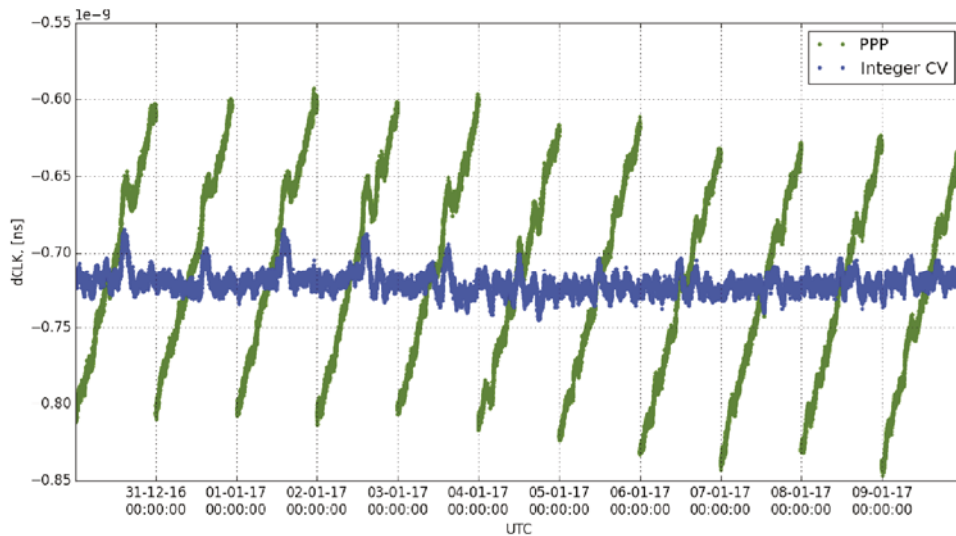


Рис. 2. Разность шкал времени приемников  $BIG_1$  и  $BIG_2$  (2016-12-30 00:00:00–2017-01-10 00:00:00), полученная методами Integer CV и PPP

щий смещение оценки разности частот опорных генераторов (полученной по оценке разности шкал времени). За сутки уход составляет порядка 200 пс, при этом СКО остаточных невязок фазовых измерений находится на субсантиметровом уровне. В решении методом Integer CV данный эффект не проявляется. Это связано с тем, что разрешая параметры фазовой неоднозначности, удается «разделить» оценку разности шкал времени приемников и погрешность измерений, вызванную рассинхронизацией. При этом остаточные невязки фазовых измерений «вберут» данные погрешности.

Разность безионосферных комбинаций фазовых измерений всех наблюдаемых НКА ГЛОНАСС для двух приемников на интервале 2016-12-27 00:00:00–2016-12-28 00:00:00 с учетом геометрической дальности  $\rho_{GS}^{SC}$  приведена на рис. 3. Для наглядности из всех сеансов вычтено среднее значение. Отметим, что кривые имеют форму, схожую с зависимостью доплеровского смещения частоты НКА от времени. Подобную форму разности измерений будут иметь в том случае, если они сформированы на моменты времени с разным положением НКА, т. е. на разные моменты времени. Таким образом, можно сделать предположение о формировании фазовых измерений разными приемниками на моменты времени, смещенные относительно истинного момента измерений (определяемого по кодовым измерениям) на разные величины. А учитывая, что положение НКА определяется по кодовым измерениям, можно говорить о разной рассинхронизации кодовых и фазовых измерений используемых приемников.

Для того чтобы убедиться, что рассинхронизация кодовых и фазовых измерений приводит к смещению в оценке разности частот опорных генераторов, было доработано программное обеспечение метода PPP в части расчета положения НКА для фазовых измерений на момент времени, смещенный на задан-

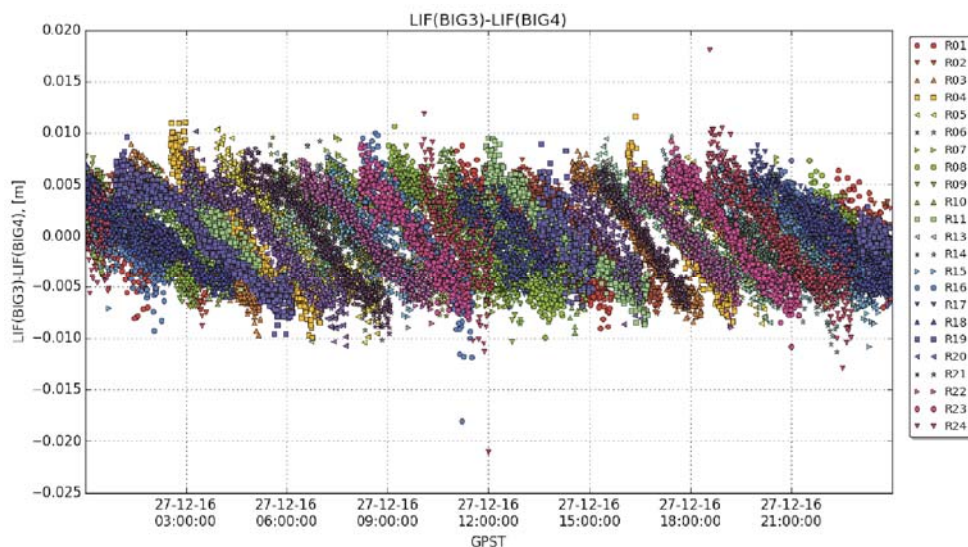


Рис. 3. Разность безионосферных комбинаций фазовых измерений всех наблюдаемых НКА ГЛОНАСС приемников  $BIG_1$  и  $BIG_2$  (2016-12-27 00:00:00–2016-12-28 00:00:00)

ную величину. Измерения приемника  $BIG_1$  были переобработаны со значениями рассинхронизации: 2, 4 и 5,5 мкс. На рис. 4 приведены полученные результаты оценки разности шкал времени приемников на интервале 2016-12-30 00:00:00–2017-01-10 00:00:00 методом PPP для разных значений рассинхронизации кодовых и фазовых измерений приемника  $BIG_1$ .

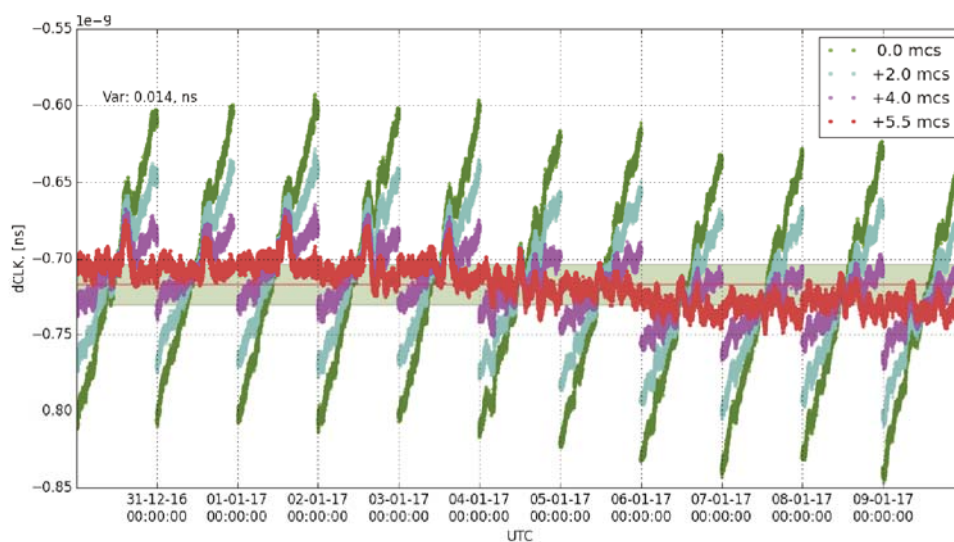
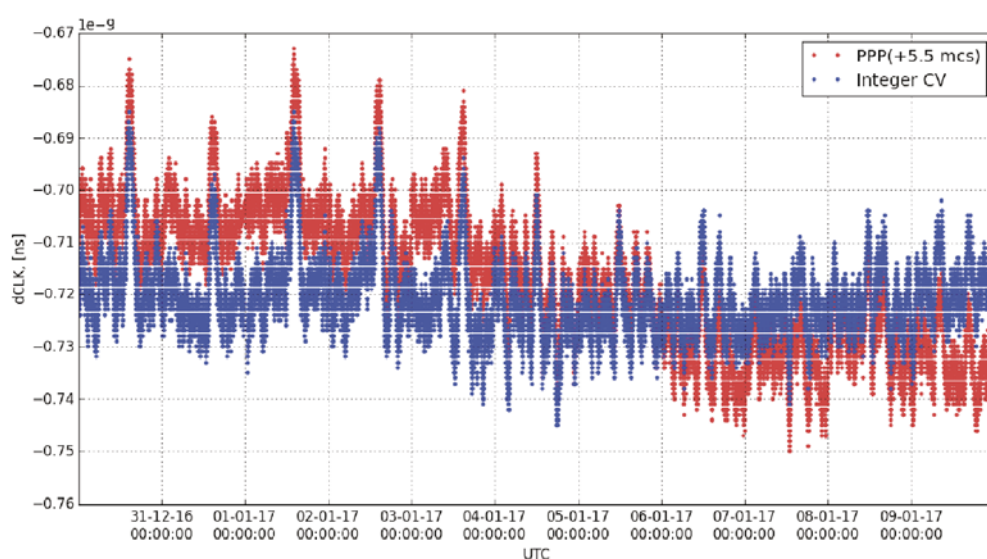


Рис. 4. Разность шкал времени приемников  $BIG_1$  и  $BIG_2$  (2016-12-30 00:00:00–2017-01-10 00:00:00), полученная методом PPP для разных значений рассинхронизации кодовых и фазовых измерений приемника  $BIG_1$

Видно, что вычисление положения НКА для фазовых измерений на смещенный момент времени позволяет устранить наклон. Для анализа результатов на рис. 5 приведена разность шкал времени приемников  $BIG_1$  и  $BIG_2$  на интервале 2016-12-30 00:00:00–2017-01-10 00:00:00, полученная методами Integer CV и PPP (с учетом опережения фазовых измерений относительно кодовых на 5,5 мкс). Результаты метода Integer CV смещены на 135 пс; СКО решения с рассинхронизацией 5,5 мкс составляет 14 пс.

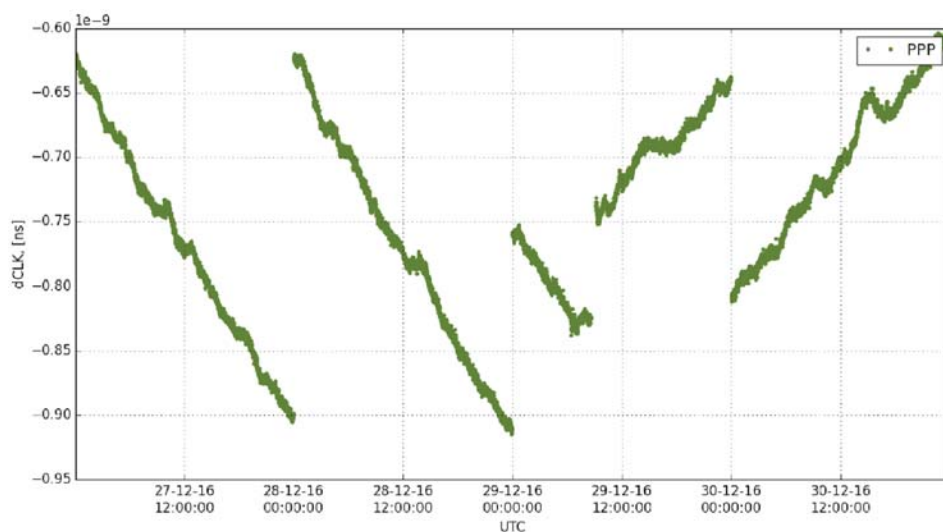


**Рис. 5.** Разность шкал времени приемников  $BIG_1$  и  $BIG_2$  (2016-12-30 00:00:00–2017-01-10 00:00:00), полученная методами Integer CV и PPP (с учетом рассинхронизации фазовых и кодовых измерений на 5,5 мкс)

Из рис. 4 и 5 следует, что для решения, соответствующего значению рассинхронизации 5,5 мкс, смещение оценки разности частот опорных генераторов полностью устраняется. Решения, выполненные методом PPP и Integer CV, согласуются с СКО на уровне 5 пс.

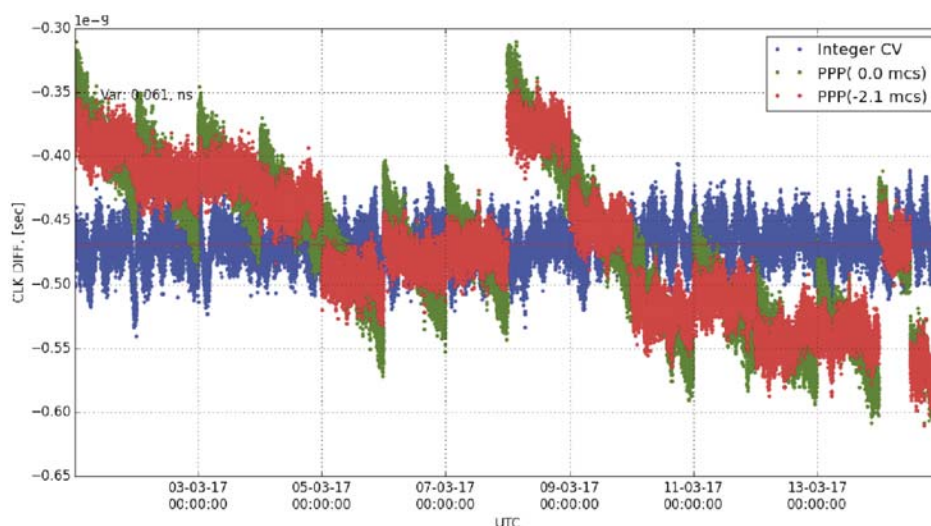
Отметим, что величина рассинхронизации измерений меняется при перезагрузке приемника. На рис. 5 приведены результаты сравнения шкал времени приемников  $BIG_1$  и  $BIG_2$  методом PPP на четырехсуточном интервале с началом 27 декабря; 29 декабря приблизительно в 09:00 (UTC) приемники были перезагружены. Из рис. 6 следует, что смещение оценки частоты, получаемой методом PPP, изменилось. Установлено, что внесение запаздывания фазовых измерений относительно кодовых на 7,3 мкс приводит к устранению данного смещения.

Во втором эксперименте два приемника GTR51  $MDE_1$  и  $MDE_2$ , установленные на территории ВНИИФТРИ, были сопряжены с разными choke-ring-антеннами и общим активным водородным генератором. Обработывались измерения в течение 14 суток (2017-03-01 00:00:00–2017-03-15 00:00:00).



**Рис. 6.** Разность шкал времени приемников  $BIG_1$  и  $BIG_2$  (2016-12-27 00:00:00–2016-12-31 00:00:00), полученная методом PPP

Полученные результаты оценки разности шкал времени приемников на интервале 2017-03-01 00:00:00–2017-03-15 00:00:00 методами Integer CV и PPP приведены на рис. 7. Синие точки — это значения, полученные методом Integer CV, зеленые — методом PPP без учета рассинхронизации кодовых и фазовых измерений, красные — методом PPP с учетом рассинхронизации 2,1 мкс для приемника MDE<sub>1</sub>. Для наглядности на графике результаты метода Integer CV были смещены на 649 пс. Разрывы на графике обусловлены межинтервальными скачками (интервал обработки — одни сутки) из-за особенностей реализации алгоритмов PPP.



**Рис. 7.** Разность шкал времени приемников  $MDE_1$  и  $MDE_2$  (2017-03-01 00:00:00–2017-03-15 00:00:00), полученная методом PPP для разных значений рассинхронизации кодовых и фазовых измерений приемника  $MDE_1$  и методом Integer CV



Кривые модифицированной вариации Аллана полученных временных рядов разности шкал времени методами *PPP* и *Integer CV* в обоих экспериментах приведены на рис. 8 (ZBL — нулевая базовая линия, SBL — малая базовая линия).

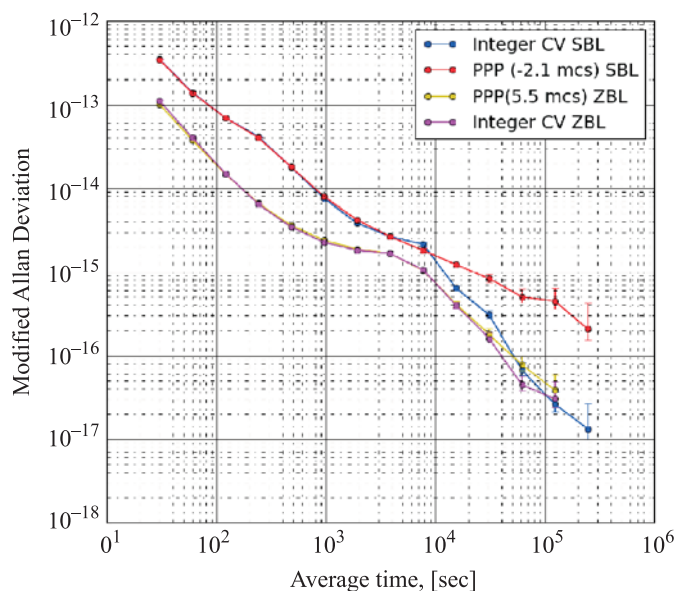


Рис. 8. Модифицированная вариация Аллана, построенная по оценкам разности шкал времени методами *Integer CV* и *PPP*

Из рис. 8 следует, что наличие межинтервальных скачков обуславливает снижение точностных характеристик метода *PPP* относительно метода *Integer CV*.

Таким образом, по результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- при сравнении шкал времени методом *PPP* по НКА ГЛОНАСС наблюдается смещение оценки разности частот опорных генераторов на уровне  $(1...3) \cdot 10^{-15}$ ;
- предположение о рассинхронизации кодовых и фазовых измерений используемых приемников объясняет наблюдаемые смещения;
- значение рассинхронизации может меняться при перезагрузке приемника;
- метод *PPP* по измерениям НКА ГЛОНАСС приемника GTR51 при условии устранения рассинхронизации измерений обеспечивает случайную погрешность сравнения шкал времени на уровне 40 пс и контроль нестабильности частоты генератора на уровне  $(5...6) \cdot 10^{-16}$  на суточном интервале усреднения;
- в решении методом *Integer CV* по измерениям НКА ГЛОНАСС с учетом целочисленного свойства неоднозначностей эффект смещения разности частот из-за рассинхронизации измерений не проявляется;
- метод *Integer CV* по измерениям НКА ГЛОНАСС приемника GTR51 обеспечивает случайную погрешность сравнения шкал времени на уровне 20 пс и контроль нестабильности частоты на уровне  $(5...6) \cdot 10^{-17}$  на суточном интервале усреднения.

**Заключение.** Рассмотрено применение метода PPP по измерениям НКА ГЛОНАСС для высокоточного сравнения частот и шкал времени. Приведены результаты экспериментов на нулевой и малой базовых линиях, обнаруживающие эффект смещения оценки разности частот опорных генераторов навигационных приемников GTR51. Показано, что рассинхронизация кодовых и фазовых измерений объясняет данное смещение. При условии устранения рассинхронизации кодовых и фазовых измерений случайная погрешность сравнения шкал времени методом PPP по измерениям НКА ГЛОНАСС находится на уровне 40 пс и контролируемая нестабильность частоты генератора на уровне  $(5...6) \cdot 10^{-16}$  для суточного интервала усреднения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Anderle R.J.* Point positioning concept using precise ephemeris // *Satellite Doppler Positioning*. 1976. P. 47–75.
2. *Обеспечение единства измерений при развитии и использовании ГЛОНАСС / О.В. Денисенко, В.Н. Федотов, И.С. Сильвестров, Ф.Р. Смирнов, Н.Р. Баженов, Л.Б. Гериева // Измерительная техника*. 2015. № 1. С. 17–21.
3. *Федотов В.Н.* Оценка погрешностей беззапросных средств измерений ГЛОНАСС // *Измерительная техника*. 2009. № 1. С. 25–28.
4. *Печерица Д.С., Федотов В.Н.* Калибровка беззапросных измерительных систем ГЛОНАСС с обеспечением прослеживаемости к государственным первичным эталонам единиц величин // *Труды VII Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение»*. 2017. С. 204–205.
5. *Defraigne P., Sleewaegen J.M.* Code-phase clock bias and frequency offset in PPP clock solutions // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. 2016. Vol. 63. No. 7. P. 986–992. DOI: 10.1109/TUFFC.2015.2501350  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7330027>
6. *Montenbruck O., Steigenberger P., Khachikyan R., Weber G., et al.* IGS-MGEX: preparing the ground for multi-constellation GNSS science // *Inside GNSS*. 2014. Vol. 9. No. 1. P. 42–49.
7. *Petit G., Luzum B., eds.* IERS Conventions. 2010. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.
8. *Sošnica K., Thaller D., Dach R., Steigenberger P., et al.* Satellite laser ranging to GPS and GLONASS // *Journal of Geodesy*. 2015. Vol. 89. No. 7. P. 725–743.  
DOI: 10.1007/s00190-015-0810-8  
URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00190-015-0810-8>
9. *Delporte J., Mercier F., Laurichesse D., Galy O.* GPS carrier-phase time transfer using single-difference integer ambiguity resolution // *International Journal of Navigation and Observation*. 2008. Vol. 2008. Art. 273785. DOI: 10.1155/2008/273785  
URL: <https://www.hindawi.com/journals/ijno/2008/273785>
10. *Tatarnikov D.V., Astakhov A.V.* Approaching millimeter accuracy of GNSS positioning in real time with large impedance ground plane antennas // *Proc. ION ITM* 2014. P. 844–848.

**Митрикас Владимир Валериевич** — начальник отдела «Развитие технологий эфемеридно-временного обеспечения» информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения ЦНИИмаш (Российская Федерация, 141070, Московская обл., г. Королёв, Пионерская ул., д. 4).

**Печерица Дмитрий Станиславович** — начальник лаборатории метрологического обеспечения навигационных измерений ВНИИФТРИ (Российская Федерация, 141570, Московская обл., Солнечногорский район, г.п. Менделеево).

**Скакун Иван Олегович** — начальник лаборатории «Экспериментальная отработка и анализ средств ЭВО» информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения ЦНИИмаш (Российская Федерация, 141070, Московская обл., г. Королёв, Пионерская ул., д. 4).

**Федотов Вячеслав Николаевич** — канд. техн. наук, заместитель начальника научно-исследовательского отделения «Разработка и эксплуатация средств метрологического обеспечения координатно-временных и навигационных систем» по научной работе ВНИИФТРИ (Российская Федерация, 141570, Московская обл., Солнечногорский район, г.п. Менделеево).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Митрикас В.В., Печерица Д.С., Скакун И.О., Федотов В.Н. Сравнение шкал времени методом PPP по измерениям навигационной аппаратуры потребителей системы ГЛОНАСС // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. № 4. С. 32–44.  
DOI: 10.18698/0236-3933-2018-4-32-44

**TIME TRANSFER USING THE PPP METHOD BASED ON MEASUREMENTS OF GLONASS USER NAVIGATION EQUIPMENT**

V.V. Mitrikas<sup>1</sup>

D.S. Pecheritsa<sup>2</sup>

I.O. Skakun<sup>1</sup>

V.N. Fedotov<sup>2</sup>

mvv@glonass-iac.ru

pecheritsa\_ds@vniiftri.ru

ivan.skakun@glonass-iac.ru

fedotov@vniiftri.ru

<sup>1</sup> **Central Research Institute of Machine Building (TsNIIMash), Korolev, Moscow Region, Russian Federation**

<sup>2</sup> **National Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radiotechnical Measurements (VNIIFTRI), Mendeleevo, Moscow Region, Russian Federation**

---

**Abstract**

The article deals with using the PPP (Precise Point Positioning) method for highly accurate time and frequency transfer in reference generators based on measurements of the GLONASS navigation spacecraft. We supply the results of experimental investigations of reference generator time transfer via the PPP method, which reveal a systematic bias in the generator frequency difference computed from the time scale differences obtained. We show that desynchronization of code and phase measurements explains this

**Keywords**

*GLONASS, GNSS, time standard, PPP method, phase ambiguity, time and frequency*

bias. We note that rebooting the receiver may lead to changes in code and phase desynchronization. We present time transfer results obtained via the differential method accounting for integer ambiguity resolution of the GLONASS navigation spacecraft phase measurements

Received 22.06.2017  
© BMSTU, 2018

---

## REFERENCES

- [1] Anderle R.J. Point positioning concept using precise ephemeris. *Satellite Doppler Positioning*, 1976, pp. 47–75.
- [2] Denisenko O.V., Fedotov V.N., Sil'vestrov I.S., Smirnov F.R., Bazhenov N.R., Gerieva L.B. Assurance of the uniformity of measurements in the development and use of GLONASS. *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 1, pp. 23–28. DOI: 10.1007/s11018-015-0657-7 Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11018-015-0657-7>
- [3] Fedotov V.N. Accuracy estimation of non-request GLONASS measuring equipment GLONASS. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2009, no. 1, pp. 25–28 (in Russ.).
- [4] Pecheritsa D.S., Fedotov V.N. [Calibration of non-request GLONASS measuring equipment providing traceability to governmental standards of units]. *Trudy VII Vserossiyskoy konferentsii «Fundamental'noe i prikladnoe koordinatno-vremennoe i navigatsionnoe obespechenie»* [Proc. VII Russ. Conf. "Fundamental and applied time-coordinate and navigation support"], 2017, pp. 204–205 (in Russ.).
- [5] Defraigne P., Sleewaegen J.M. Code-phase clock bias and frequency offset in PPP clock solutions. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2016, vol. 63, no. 7, pp. 986–992. DOI: 10.1109/TUFFC.2015.2501350 Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7330027>
- [6] Montenbruck O., Steigenberger P., Khachikyan R., Weber G., Langley R.B., Mervart L., Hugentobler U. IGS-MGEX: preparing the ground for multi-constellation GNSS science. *Inside GNSS*, 2014, vol. 9, no. 1, pp. 42–49.
- [7] Petit G., Luzum B., eds. IERS Conventions. 2010. Frankfurt am Main, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.
- [8] Sośnica K., Thaller D., Dach R., Steigenberger P., Beutler G., Arnold D., Jäggi A. Satellite laser ranging to GPS and GLONASS. *Journal of Geodesy*, 2015, vol. 89, no. 7, pp. 725–743. DOI: 10.1007/s00190-015-0810-8 Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00190-015-0810-8>
- [9] Delporte J., Mercier F., Laurichesse D., Galy O. GPS carrier-phase time transfer using single-difference integer ambiguity resolution. *International Journal of Navigation and Observation*, 2008, vol. 2008, art. 273785. DOI: 10.1155/2008/273785 Available at: <https://www.hindawi.com/journals/ijno/2008/273785>
- [10] Tatarnikov D.V., Astakhov A.V. Approaching millimeter accuracy of GNSS positioning in real time with large impedance ground plane antennas. *Proc. ION ITM*, 2014, pp. 844–848.

**Mitrikas V.V.** — Head of Department of Ephemeris Time Support Development, Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing, Central Research Institute of Machine Building (TsNIIMash) (Pionerskaya ul. 4, Korolev, Moscow Region, 141070 Russian Federation).

**Pecheritsa D.S.** — Head of Laboratory of Metrological Assurance of Navigation Measurements, National Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radiotechnical Measurements (VNIIFTRI) (Mendeleevo, Solnechnogorsky Region, Moscow Region, 141570 Russian Federation).

**Skakun I.O.** — Head of Laboratory of Testing and Analysis of Means of Ephemeris Time Support, Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing, Central Research Institute of Machine Building (TsNIIMash) (Pionerskaya ul. 4, Korolev, Moscow Region, 141070 Russian Federation).

**Fedotov V.N.** — Cand. Sc. (Eng.), Deputy Head (responsible for research activity) of Scientific and Research Department of Development and Operation of Means of Metrological Assurance of Positioning, Navigation and Timing Systems, National Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radiotechnical Measurements (VNIIFTRI) (Mendeleevo, Solnechnogorskiy Region, Moscow Region, 141570 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Mitrikas V.V., Pecheritsa D.S., Skakun I.O., Fedotov V.N. Time Transfer using the PPP Method Based on Measurements of GLONASS User Navigation Equipment. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2018, no. 4, pp. 32–44 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2018-4-32-44