

И. О. СКАКУН, В. В. МИТРИКАС

СРАВНЕНИЕ ШКАЛ ВРЕМЕНИ МЕТОДОМ COMMON VIEW ПО ИЗМЕРЕНИЯМ НКА ГЛОНАСС С УЧЕТОМ ЦЕЛОЧИСЛЕННОГО СВОЙСТВА ФАЗОВЫХ НЕОДНОЗНАЧНОСТЕЙ

В работе приведены результаты экспериментальных исследований сравнения шкал времени дифференциальным методом по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), показывающие возможность учета целочисленного свойства неоднозначностей НКА ГЛОНАСС. Получаемая при этом величина случайной погрешности сравнения шкал времени находится на уровне 55 нс.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, фазовая неоднозначность, спутниковые системы, погрешность, шкала времени.

Введение

Любой канал передачи времени и частоты характеризуется случайной и систематической погрешностями. При использовании измерений сигналов ГНСС систематическая погрешность сравнения шкал времени определяется точностью калибровки навигационной аппаратуры (навигационный приемник, антенна, антенный кабель), которая, как правило, выполняется на базе метрологических институтов и на современном этапе составляет единицы наносекунд. Случайная погрешность в наибольшей степени определяется точностью используемых измерений. При обработке только кодовых измерений сигналов ГНСС случайная погрешность сравнения шкал времени составляет единицы наносекунд. Для ее снижения необходимо использовать фазовые измерения, которые потенциально позволяют обеспечить снижение случайной погрешности до единиц пикосекунд. Особенностью фазовых измерений является то, что они дают возможность определить приращение показаний часов, но не позволяют судить об их абсолютном значении. Использование фазовых измерений, во-первых, требует решения дополнительных задач в обработке, например детектирования и восстановления пропусков циклов фазовых измерений, уточнения параметров фазовой неоднозначности наряду с другими параметрами и т.д., а во-вторых, кардинально повышает требования к учету эффектов, влияние которых превышает погрешность фазовых измерений.

Областью значений параметров фазовой неоднозначности является множество целых чисел, но до недавнего времени на практике это свойство, как правило, не учитывалось и неоднозначности уточнялись в виде действительных чисел. Это связано как с неразвитостью технологии уточнения орбит и поправок часов навигационных космических аппаратов (НКА), так и с тем, что навигационная аппаратура потребителей (НАП) не удовлетворяла требованиям в части систематических смещений измерений.

Скакун Иван Олегович. Кандидат технических наук, начальник лаборатории ИАЦ КВНО, ФГУП «ЦНИИмаш» (г. Королёв Московской обл.).

Митрикас Владимир Валерьевич. Начальник отдела ИАЦ КВНО, ФГУП «ЦНИИмаш».

При обработке фазовых измерений в частотно-временных приложениях также используется подход, при котором параметры фазовой неоднозначности уточняются как действительные числа без учета их целочисленного свойства. В случае дифференциальных методов сравнения шкал времени использование данного подхода обуславливает высокую погрешность результатов, сравнимую с погрешностью решения по кодовым измерениям. В случае абсолютных методов позиционирования (Precise Point Positioning, PPP) это приводит к известной проблеме межинтервальных скачков, которые возникают на границе между независимыми интервалами обработки (как правило, суточными, где выполняется единичное решение по уточнению эфемеридно-временной информации – ЭВИ) [8]. Исследования в этой области показывают, что такие скачки обусловлены низкой точностью оценки параметров фазовой неоднозначности из-за высоких погрешностей кодовых измерений, в том числе систематических. Другими словами, низкая точность кодовых измерений не позволяет полностью использовать точность фазовых измерений. Межинтервальные скачки вызывают существенное снижение точности канала передачи времени и частоты на интервалах усреднения больше суток.

В последнее время было предложено несколько подходов для решения данной проблемы. Наиболее значимым является подход, в основе которого лежит уточнение параметров фазовой неоднозначности с учетом их целочисленного свойства.

Систематические смещения измерений НКА GPS современной НАП удовлетворяют требованиям, необходимым для учета целочисленного свойства параметров фазовых неоднозначностей, что позволило реализовать методы дифференциальных (carrier-phase Common View) [10] и абсолютных (integer PPP) [3] сравнений шкал времени с его учетом, обуславливающие кардинальное снижение случайной погрешности сравнения шкал времени, в то время как для НКА ГЛОНАСС подобных методов не существует.

К тому же было установлено, во-первых, что причина межлитерных систематических смещений лежит не в аналоговом тракте, а в части цифровой обработки [9], во-вторых, что дополнительные опции НАП (например, подавление эффекта многолучевости), с одной стороны, позволяют повысить точностные характеристики аппаратуры, а с другой – приводят к изменению систематических смещений [12]. Для проверки гипотезы разрешения параметров фазовой неоднозначности НКА ГЛОНАСС была проведена серия экспериментов с использованием современной НАП геодезического класса с отключением всех дополнительных опций, влияющих на систематические смещения кодовых измерений.

С учетом того что ЭВИ, формируемая международной службой ГНСС IGS и большинством центров анализа, не сохраняет целочисленное свойство неоднозначностей НКА ГЛОНАСС, в работе использовался дифференциальный метод, позволяющий исключить из уравнений измерений поправки часов НКА и тем самым вынести задачу уточнения поправок часов за рамки данной работы. Надо отметить, что предварительные экспериментальные исследования в части формирования поправок часов, позволяющих учитывать целочисленное свойство неоднозначностей, показывают, что по сети станций системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ) возможно формирование целочисленных часов, в том числе для НКА ГЛОНАСС.

Первый эксперимент был проведен на нулевой базовой линии (общие часы и антенна). Полученные результаты позволили оценить предельно достижимую

погрешность сравнения шкал времени по измерениям НКА ГЛОНАСС. В эксперименте использовались приемники DICOM GTR51 (позволяют формировать навигационные измерения в шкале времени опорного стандарта времени и частоты) и Large Impedance Ground Plane антенна с эффектом подавления многолучевости [15]. Второй эксперимент был проведен на средней базовой линии (~400 км) между двумя приемниками из состава сети станций СДКМ, расположенных в г. Геленджик (RGEL) и г. Кисловодск (RKIS). Станции сети СДКМ оснащены навигационными приемниками разработки ОАО «Российские космические системы». В ходе второго эксперимента получена оценка согласования решения по НКА GPS и НКА ГЛОНАСС. И в том и в другом случае учитывалось целочисленное свойство параметров фазовой неоднозначности.

Технология обработки

В упомянутых экспериментах обработка проводилась как дифференциальным, так и абсолютным методами. При их реализации принята следующая модель измерений псевдодальности $P_{r,i}^s$ и псевдофазы $L_{r,i}^s$ для заданной пары приемник–спутник (r – s) на исходных частотах:

$$\begin{aligned} P_{r,i}^s &= \rho_r^s + T_r^s + I_{r,i}^s + cdt_r - cdt_i^s + b_{r,P_i}^s + \epsilon_{r,P_i}^s, \\ L_{r,i}^s &= \rho_r^s + T_r^s - I_{r,i}^s + cdt_r - cdt_i^s + b_{r,L_i}^s + \lambda_i^s N_{r,i}^s + \Delta\rho_{r,\text{windup},L_i}^s + \phi_{0,r,L_i} + \epsilon_{r,L_i}^s, \\ \lambda_i^s &= \frac{c}{f_i^s}, \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ_r^s – геометрическая дальность с учетом вариаций фазовых центров приемной и излучающих антенн, приливных деформаций в теле Земли и гравитационной задержки; T_r^s – тропосферная задержка распространения сигнала между спутником s и приемником r ; $I_{r,i}^s$ – ионосферная задержка распространения сигнала между спутником s и приемником r ; dt_r – смещение показаний часов навигационного приемника r относительно показаний часов системы; dt_i^s – смещение показаний часов спутника s относительно показаний часов системы с учетом релятивистской поправки, обусловленной эллиптичностью орбиты НКА; $\Delta\rho_{r,\text{windup},L_i}^s$ – систематическое смещение измерений псевдофазы спутника s , связанное с взаимной ориентацией антенн спутника и навигационного приемника; f_i^s – частота несущего колебания спутника s с учетом литерной зависимости для НКА ГЛОНАСС; ϕ_{0,r,L_i} – фаза начального колебания генератора приемника r ; b_{r,P_i}^s, b_{r,L_i}^s – систематические смещения в аппаратуре приемника r НКА s кодовых и фазовых измерений; λ_i^s – длина волны несущей i ; $N_{r,i}^s$ – параметр фазовой неоднозначности на частоте i ; $\epsilon_{r,P_i}^s, \epsilon_{r,L_i}^s$ – погрешность измерений псевдодальности и псевдофазы НКА s в навигационном приемнике r ; i – номер частоты несущей; c – скорость света.

Для компенсации влияния ионосферы в обработке используется безыоносферная кодовая и безыоносферная фазовая комбинации двухчастотных измерений [5], которые формируются в соответствии со следующим выражением:

$$\begin{aligned}
 P_{r,IF}^s &= \frac{(f_1^s)^2 P_{r,1}^s - (f_2^s)^2 P_{r,2}^s}{(f_1^s)^2 - (f_2^s)^2} = \rho_r^s + T_r^s + cdt_r - cdt_{IF}^s + b_{r,P_{IF}}^s + \epsilon_{r,P_{IF}}^s, \\
 L_{r,IF}^s &= \frac{(f_1^s)^2 L_{r,1}^s - (f_2^s)^2 L_{r,2}^s}{(f_1^s)^2 - (f_2^s)^2} = \rho_r^s + T_r^s + cdt_r - cdt_{IF}^s + b_{r,L_{IF}}^s + \lambda_{IF}^s N_{r,IF}^s \\
 &\quad + \Delta\rho_{r,windup,L_{IF}}^s + \phi_{0,r,L_{IF}} + \epsilon_{r,L_{IF}}^s,
 \end{aligned} \tag{2}$$

В качестве ЭВИ в обоих экспериментах использовалась финальная ЭВИ ИАЦ КВНО с 30-секундным шагом.

В основе метода PPP 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. Решение сформированной системы выполняется методом наименьших квадратов. Погрешность уточнения координат в подобном решении находится на уровне единиц сантиметров. В используемой реализации метода PPP параметры фазовой неоднозначности и НКА ГЛОНАСС и НКА GPS уточняются в области действительных чисел.

В методе Common View используются разности безыоносферных комбинаций кодовых и фазовых измерений двух станций (r_1, r_2 ; $r_1 - r_2$), что позволяет исключить из рассмотрения поправки часов НКА:

$$\begin{aligned}
 \nabla P_{r_1,IF}^s &= \nabla \rho_{r_1}^s + \nabla T_{r_1}^s + c(\nabla dt_{r_1} + \nabla b_{r_1,P_{IF}}^s) + \epsilon_{r_1,P_{IF}}^s, \\
 \nabla L_{r_1,IF}^s &= \nabla \rho_{r_1}^s + \nabla T_{r_1}^s + c(\nabla dt_{r_1} + \nabla b_{r_1,L_{IF}}^s) + \\
 &\quad \frac{\lambda_1^s \lambda_2^s}{(\lambda_2^s)^2 - (\lambda_1^s)^2} \left[\lambda_2^s \left[N_{r_1,1}^s - N_{r_2,1}^s \right] - \right. \\
 &\quad \left. \lambda_1^s \left[N_{r_1,2}^s - N_{r_2,2}^s \right] \right] + \nabla \Delta\rho_{r_1,2,windup,L_{IF}}^s + \nabla \phi_{0,r_1,2,L_{IF}} + \epsilon_{r_1,2,L_{IF}}^s.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Для учета целочисленного свойства неоднозначностей используется представление слагаемого неоднозначности в выражении (3) в виде линейной комбинации неоднозначности типа wide-lane [13] (разностная неоднозначность) $N_{r,1}^s - N_{r,2}^s$ и неоднозначности на первой частоте $N_{r,1}^s$:

$$\frac{\lambda_1^s \lambda_2^s}{(\lambda_2^s)^2 - (\lambda_1^s)^2} \left[\lambda_2^s N_{r,1}^s - \lambda_1^s N_{r,2}^s \right] = \frac{\lambda_1^s \lambda_2^s}{\lambda_2^s + \lambda_1^s} N_{r,1}^s + \frac{(\lambda_1^s)^2 \lambda_2^s}{(\lambda_2^s)^2 - (\lambda_1^s)^2} \left[N_{r,1}^s - N_{r,2}^s \right]. \tag{4}$$

Из выражений вида (3) на каждую эпоху формируются системы уравнений по измерениям всех НКА ГЛОНАСС, наблюдаемых обеими станциями. Для преодоления вырожденности вводится новый параметр разности шкал времени $\widehat{\nabla dt}_{r_1,2} = \nabla dt_{r_1,2} + \nabla b_{r_1,2,L_{IF}}^s + \nabla \phi_{0,r_1,2,L_{IF}} / c$, который содержит неизвестную раз-

ность систематических смещений фазовых измерений $\nabla b_{r_{12},L_{IF}}^s$ (считается одинаковой для всех НКА ГЛОНАСС) и разность фаз начальных колебаний генераторов $\nabla \phi_{0,r_{12},L_{IF}}$. Разность систематических смещений кодовых измерений $\nabla b_{r_{12},P_{IF}}^s$ также считается одинаковой для всех НКА в обработке. Разность неоднозначностей $N_{r,1}^s - N_{r,2}^s$ в выражении (4) для двух станций вычисляется предварительно с использованием комбинации двухчастотных кодовых и фазовых измерений Melbourne–Wubben [1, 2] для каждого сеанса в обработке на интервалах не менее 30 мин. Это делается с помощью простого округления. Основываясь на предположении о безошибочном разрешении неоднозначности для комбинации Melbourne–Wubben, далее будем считать разности $N_{r,1}^s - N_{r,2}^s$ известными. В состав уточняемых параметров входят смещенная разность шкал времени приемников $\overline{\nabla dt}_{r_{12}}$ и разности параметров неоднозначности приемников на первой частоте $N_{r_{12},1}^s = N_{r_{1,1}}^s - N_{r_{2,1}}^s$. Координаты приемников предварительно вычислялись методом PPP и в данном решении не уточняются. Разность тропосферных задержек $\nabla T_{r_{12}}^s$ в выражении (3) вычисляется по результатам уточнения зенитной тропосферной задержки методом PPP. Вектор состояния оценивается с использованием фильтра Калмана. При этом параметры разности шкал времени на разные эпохи предполагаются независимыми, то есть моделируются белым шумом, в то время как параметры фазовой неоднозначности моделируются как константы. Разрешение неоднозначности $N_{r_{2,1}}^s$ выполняется методом последовательных округлений (*bootstrapping*) [18].

Отметим, что используемый в методе *Common View* подход к разрешению фазовой неоднозначности – сначала путем простого округления для Melbourne–Wubben, потом для L1 с помощью *bootstrapping* – носит эмпирический характер и может несколько проигрывать в качестве решения оптимальному подходу с разрешением неоднозначности сразу для двух частот и с применением LAMBDA-метода, позволяющего сократить объем вычислений при поиске целого числа периодов фазовых измерений [4, 6, 16]. Применение в данной работе метода *Common View* объясняется желанием авторов использовать для обработки протяженных реализаций измерений длительностью в несколько суток апробированный ими метод с приемлемыми вычислительными затратами.

Фактически при выполнении условия о равенстве разности систематических смещений между станциями для разных НКА обработка измерений НКА ГЛОНАСС не отличается от обработки измерений НКА GPS.

Результаты обработки

Для экспериментального исследования возможности целочисленного разрешения параметров фазовой неоднозначности НКА ГЛОНАСС и достигаемой при этом точности сравнения шкал времени было проведено несколько экспериментов. Ниже приведены результаты эксперимента с общей антенной и часами и эксперимента на средней базовой линии. При этом обработка проводилась тремя методами: *integer Common View* по НКА ГЛОНАСС (*iCV (GLO)*), *integer Common View* по НКА GPS (*iCV (GPS)*) и *float PPP* по НКА GPS и ГЛОНАСС (*PPP*) (*integer* – решение с учетом целочисленного свойства неоднозначностей,

float – без). Являясь штатным средством сравнения шкал времени при построении международной координированной шкалы времени UTC, метод float PPP удобен для анализа достигнутых точностных характеристик.

Поскольку нет возможности сопоставить полученные результаты с результатами независимых методов сравнения шкал времени, например TWSTFT (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer) [11] и TWOTFT (Two-Way Optical Time and Frequency Transfer) [17], в рамках второго эксперимента проводилась оценка результатов, полученных с применением метода iCV по НКА GPS. Программно-математическое обеспечение для НКА GPS тестировалось в ходе большого количества экспериментов, кроме того, оно использовалось для получения результатов, представленных в [7]. Данная реализация дифференциального метода сравнения шкал времени по НКА GPS обеспечивает случайную погрешность на уровне 50 пс и оценку нестабильности частоты опорного генератора на уровне $4\text{--}5\text{E-}16$, что было подтверждено путем сравнения с методом TWOTFT на базовой линии ~400 км (г. Варшава и г. Боровиц, Польша). При интерпретации результатов эксперимента необходимо учитывать, что нельзя говорить о независимости погрешностей измерений НКА ГЛОНАСС и GPS, что подчеркивает актуальность проведения эксперимента по сравнению метода iCV по сигналам НКА ГЛОНАСС с независимым методом (TWOTFT).

В ходе первого эксперимента два приемника GTR51 (Model TRE_G3TH; Board Version TRE_G3TH_8; Board Firmware Version 3.5.13 May, 18, 2016) BIG1 и BIG2 были установлены на территории ФГУП «ВНИИФТРИ» и сопряжены с общей антенной и общим активным водородным генератором. Обработывались измерения на 11-суточном интервале 2016-12-30 00:00:00 – 2017-01-10 00:00:00.

Для разрешения неоднозначностей комбинации wide-lane в ходе каждого эксперимента выполнялась калибровка систематических смещений комбинации Melbourne–Wubbena измерений НКА GPS и ГЛОНАСС. Алгоритм расчета систематических смещений схож с алгоритмом, описанным в работе [14]. Для расчета использовались измерения двух приемников, участвующих в обработке сигналов в каждом эксперименте. Калибровочные поправки для НКА ГЛОНАСС и НКА GPS рассчитывались независимо друг от друга. Для примера на рис. 1 приведены значения дробной части комбинаций Melbourne–Wubbena НКА ГЛОНАСС приемника BIG1 на 11-суточном интервале начиная с 30 декабря с учетом калибровочных поправок. Значение дробной части комбинации Melbourne–Wubbena в сеансе представлено горизонтальным отрезком с маркерами по краям, длина отрезка соответствует длительности сеанса. Среднее значение всего набора точек служит приближенной оценкой систематической погрешности этой комбинации, вносимой приемником. На рис. 1 видно, что значения находятся в диапазоне от $-0,07$ до $0,27$, то есть по модулю не превышают $0,17$ относительно среднего значения, что позволяет гарантированно разрешить wide-lane неоднозначность всех сеансов в обработке. Следует отметить, что о таком разрешении неоднозначностей Melbourne–Wubbena уверенно говорить нельзя, так как истинное значение неизвестно. Однако тот факт, что дробные части комбинации Melbourne–Wubbena для всех сеансов близки к определенному значению, указывает на то, что, вероятно, систематические смещения используемых приемников идентичны и найденные значения неоднозначностей корректны. Кроме того, судя по устойчивости дробной части комбинации Melbourne–Wubbena, можно утверждать, что многолучевость в данном эксперименте не оказывает значимого влияния на разрешение неоднозначностей.

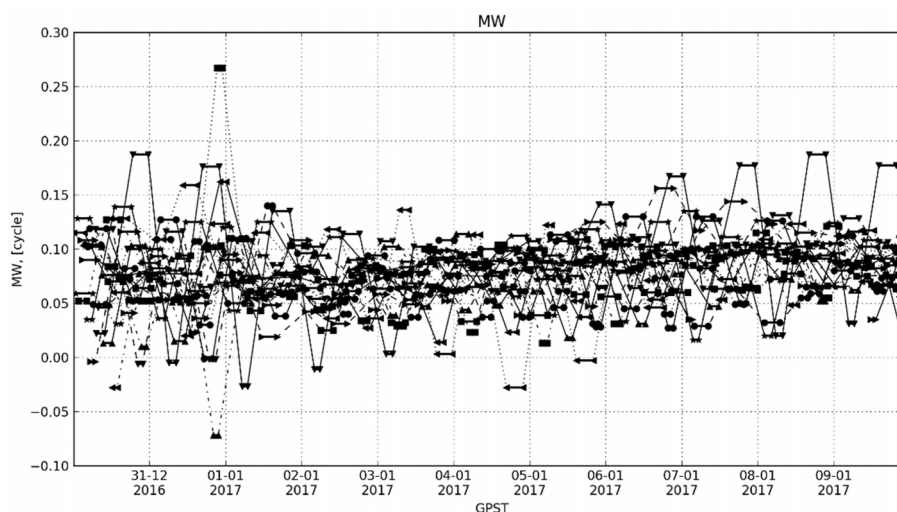


Рис. 1. Значения дробной части комбинаций Melbourne–Wubena НКА ГЛОНАСС приемника BIG1 с учетом калибровочных поправок

Для НКА GPS значения дробной части комбинации Melbourne–Wubena с учетом калибровочных поправок находятся в полосе 0,25 цикла широкой комбинации.

На рис. 2 приведены результаты, полученные методами iCV (GLO), iCV (GPS) и PPP в период с 30.12.2016 по 10.01.2017. Точки, соединенные штрихпунктирной линией, – значения, полученные методом iCV (GLO), пунктирной линией – методом iCV (GPS), сплошной – PPP. На рис. 3 приведены результаты метода iCV (GLO) с соответствующим спектральным разложением (по оси абсцисс отложены периоды спектральных компонент в сутках (T), по оси ординат – амплитуды в пикосекундах, $f(T)$). На рис. 4 приведена разность результатов, полученных методами iCV (GLO) и iCV (GPS).

На рис. 5 представлена модифицированная вариация Аллана, вычисленная по результатам, полученным с помощью методов iCV (GLO), iCV (GPS), PPP, и разности результатов, полученных с использованием методов iCV (GLO) и iCV (GPS).

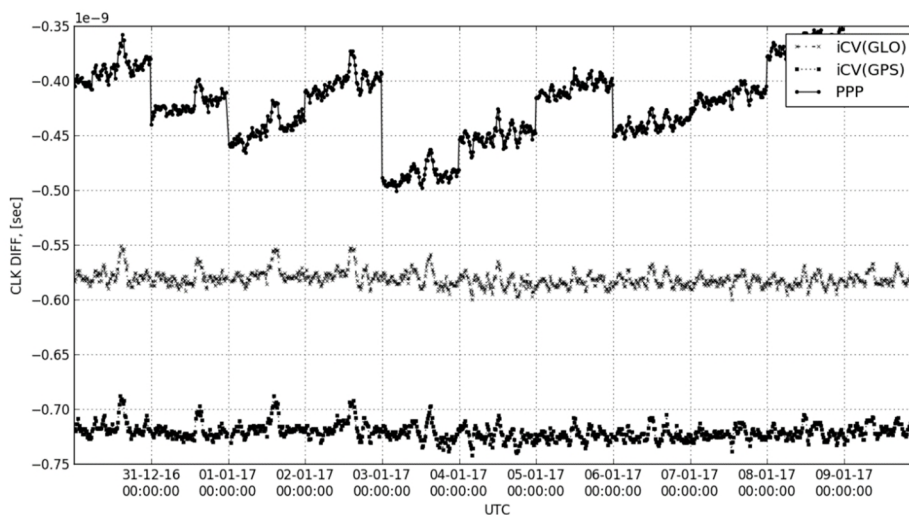


Рис. 2. Разность шкал времени приемников BIG1 и BIG2 в период с 2016-12-30 00:00:00 по 2017-01-10 00:00:00, полученная с использованием методов iCV и PPP

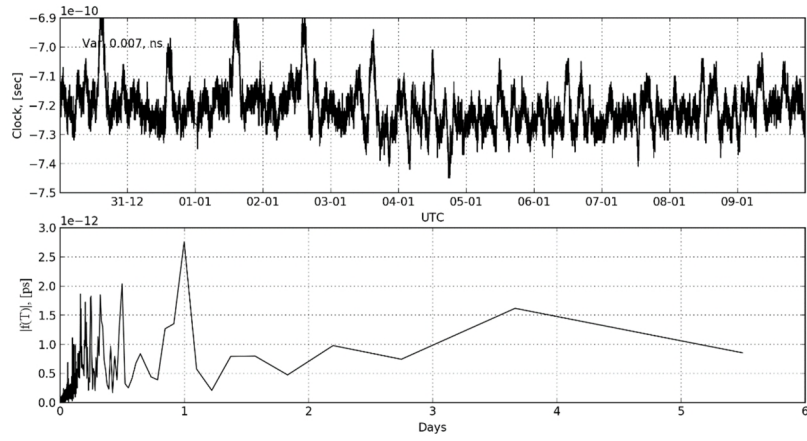


Рис. 3. Разность шкал времени приемников BIG1 и BIG2 в период с 2016-12-30 00:00:00 по 2017-01-10 00:00:00, полученная с использованием метода iCV (GLO), и соответствующее спектральное разложение

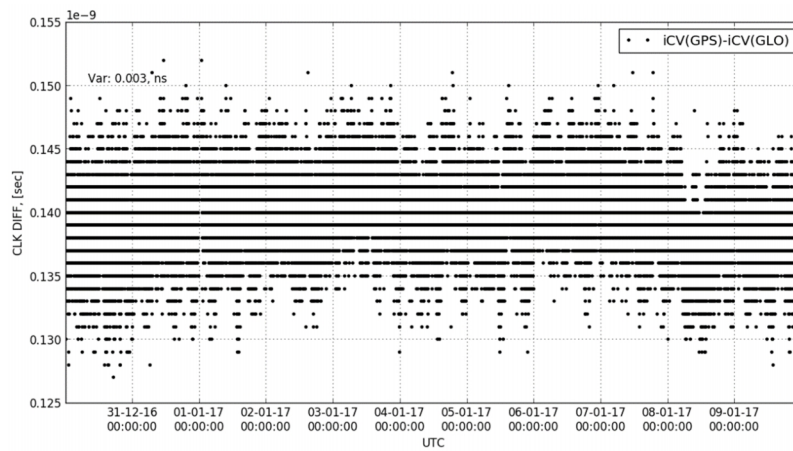


Рис. 4. Разность результатов, полученных с использованием методов iCV (GLO) и iCV (GPS) в период с 2016-12-30 00:00:00 по 2017-01-10 00:00:00

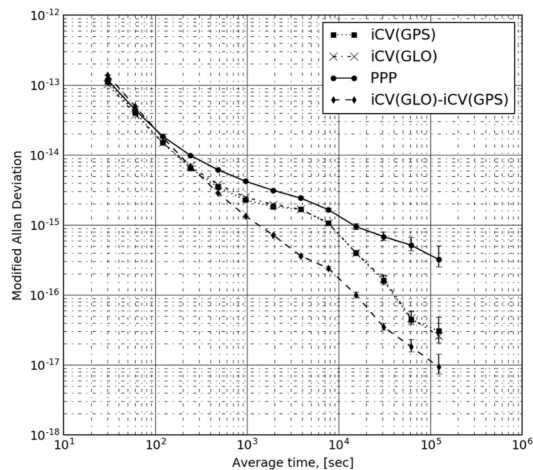


Рис. 5. Модифицированная вариация Аллана, вычисленная по результатам, полученным с использованием методов iCV (GLO), iCV (GPS), PPP, и разности результатов, полученных с использованием методов iCV (GLO) и iCV (GPS)

Было разрешено 100% неоднозначностей на первой частоте сеансов с фиксированными wide-lane неоднозначностями на всем интервале обработки. Результаты сравнения шкал времени методом Common View по НКА ГЛОНАСС и по НКА GPS с учетом целочисленного свойства неоднозначностей в эксперименте на нулевой базовой линии согласуются с погрешностью 3 пс (среднеквадратическая погрешность – СКП), что несколько превышает ожидания и соответствует очень низкой погрешности фазовых измерений. Это связано с высокими точностными характеристиками используемой антенны. СКП разности шкал времени приемников BIG1 и BIG2, сопряженных с общими часами и общей антенной, которая была получена с использованием метода iCV (GLO), на 11-суточном интервале составила 7 пс. Полученные результаты отражают некоторую предельную характеристику точности методов сравнения шкал времени с использованием сигналов ГНСС.

Второй эксперимент был проведен на средней базовой линии (~400 км) между двумя приемниками из состава сети станций СДКМ, расположенных в г. Геленджике (RGEL) и г. Кисловодске (RKIS). Станции сети СДКМ оснащены навигационными приемниками разработки ОАО «Российские космические системы». Обработывались измерения на 5-суточном интервале с 2016-11-13 00:00 по 2016-11-18 00:00.

На рис. 6 приведены значения дробной части комбинаций Melbourne–Wubbena НКА ГЛОНАСС приемника RGEL на 5-суточном интервале начиная с 13 ноября с учетом калибровочных поправок. Значение дробной части комбинации Melbourne–Wubbena в сеансе представлено горизонтальным отрезком с маркерами по краям, длина отрезка соответствует длительности сеанса. На рис. 6 видно, что ее значения, за исключением НКА R05 (круглые маркеры в нижней части графика), находятся в диапазоне от $-0,10$ до $0,45$, то есть по модулю не превышают $0,30$ относительно среднего значения, что позволяет гарантированно разрешить wide-lane неоднозначность сеансов в обработке. Для сеансов НКА ГЛОНАСС станции RKIS и сеансов НКА GPS станций RGEL и RKIS наблюдается аналогичная картина.

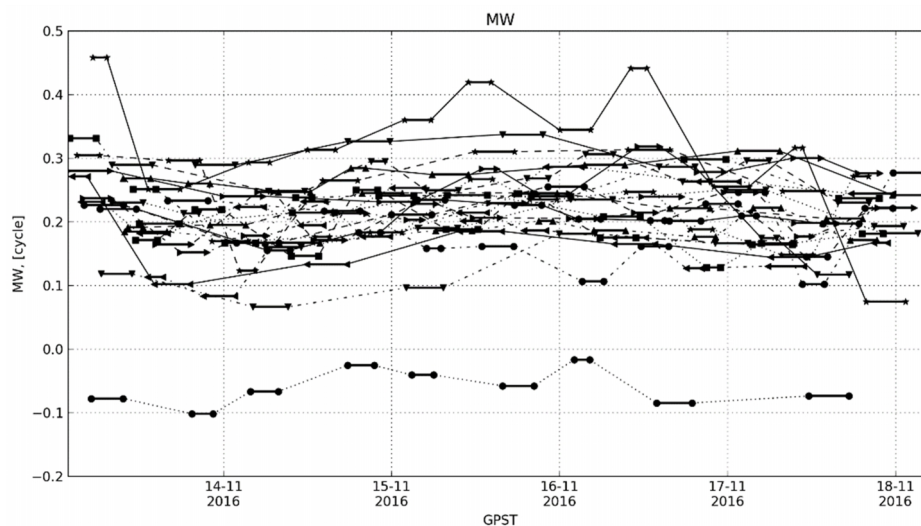


Рис. 6. Значения дробной части комбинаций Melbourne–Wubbena НКА ГЛОНАСС приемника RGEL с учетом калибровочных поправок

На рис. 7 приведены разности результатов, полученных методами iCV (GLO) и PPP, и результатов, полученных методом iCV (GPS), в период с 13.11.2016 по 18.11.2016 (разность результатов методов iCV (GPS) – PPP смещена на 4,4 нс).

На рис. 8 приведены модифицированные вариации Аллана, вычисленные по результатам iCV (GPS) – iCV (GLO) и iCV (GPS) – PPP.

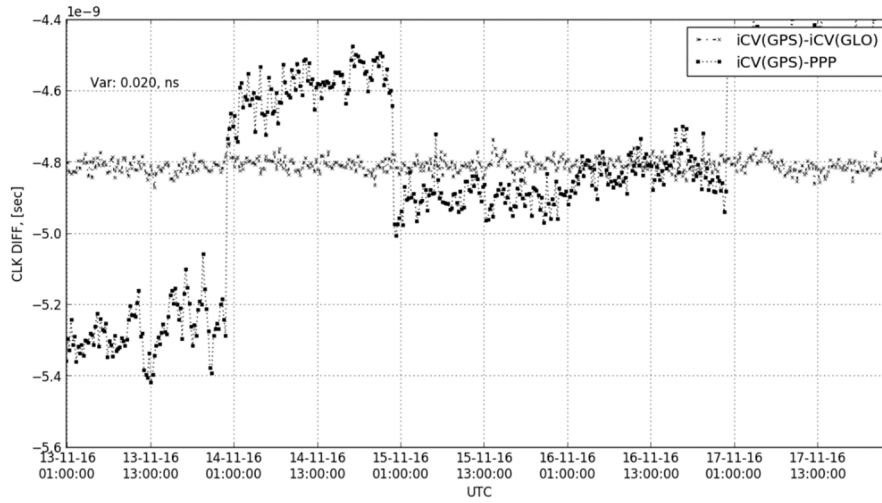


Рис. 7. Разности результатов, полученных методами iCV (GLO) и PPP, и результатов, полученных методом iCV (GPS) в период с 13.11.2016 по 18.11.2016

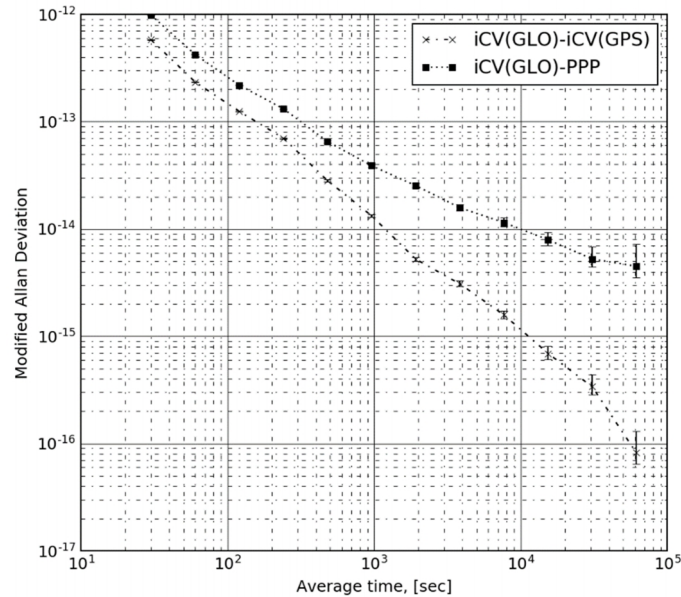


Рис. 8. Модифицированные вариации Аллана, вычисленные по результатам, полученным методами iCV (GPS) – iCV (GLO) и iCV (GPS) – PPP

Так же как и в первом эксперименте, неоднозначности на первой частоте всех сеансов, для которых была зафиксирована wide-lane неоднозначность, были зафиксированы. СКП согласования решений по НКА ГЛОНАСС и по НКА GPS составила 20 пс.

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

- в обоих экспериментах были зафиксированы неоднозначности первой частоты всех сеансов, для которых была разрешена wide-lane неоднозначность;
- результаты, полученные методом float PPP, согласуются с результатами, полученными с помощью методов iCV с характерной для float PPP погрешностью (СКП 25 пс в первом эксперименте и 150 пс – во втором);
- СКП согласования решения по НКА ГЛОНАСС и по НКА GPS в первом эксперименте на нулевой базе составило 3 пс, а во втором на базе 400 км – 20 пс;
- учитывая, что метод дифференциальных сравнений шкал времени с учетом целочисленного свойства неоднозначностей НКА GPS обеспечивает случайную погрешность на уровне 50 пс и контроль нестабильности частоты на уровне $4\text{-}5\text{E-}16$, дифференциальный метод по измерениям НКА ГЛОНАСС, в предположении о независимости погрешностей измерений для двух систем, обеспечивает случайную погрешность сравнения шкал на уровне не хуже 55 пс и контроль нестабильности генераторов на уровне $4\text{-}5\text{E-}16$ для суточного интервала усреднения.

Заключение

Возможность учета целочисленного свойства неоднозначностей напрямую связана с систематическими смещениями как кодовых, так и фазовых измерений. В начале 1990-х годов центры анализа международной службы IGS стали учитывать данное свойство, но не в прямых измерениях, а во вторых разностях (double differences), в которых, как известно, параметры поправок часов станций и НКА исключаются. В 2008 году было показано, что возможно целочисленное разрешение первых разностей (станция–станция) неоднозначностей измерений НКА GPS. До недавнего времени получить подобный результат по сигналам НКА ГЛОНАСС было нельзя, из-за того что не существовало такой НАП, которая бы удовлетворяла требованиям в части систематических смещений для учета целочисленного свойства неоднозначностей. На текущий момент имеются приемники сигналов ГЛОНАСС, которые таким требованиям удовлетворяют, что позволило осуществить данное исследование.

В работе показано, что по измерениям ГЛОНАСС можно проводить сравнения шкал времени с точностью, аналогичной точности методов на основе сигналов GPS, за счет учета целочисленного свойства параметров фазовой неоднозначности. Такая возможность появилась благодаря, во-первых, разработке НАП, удовлетворяющей требованиям в части систематических смещений, во-вторых, совершенствованию модели измерений и повышению точности используемых коррекций и, в-третьих, прогрессу в сфере алгоритмов обработки.

В статье приведены результаты эксперимента с общей антенной и часами и эксперимента на средней базовой линии. Результаты обоих экспериментов демонстрируют успешное разрешение параметров фазовой неоднозначности НКА ГЛОНАСС. По значениям величины согласования результатов сравнения шкал времени по измерениям НКА ГЛОНАСС с результатами апробированного ранее метода по измерениям НКА GPS, обеспечивающего случайную погрешность сравнения шкал времени на уровне 50 пс, можно сделать вывод, что дифференциальный метод по измерениям НКА ГЛОНАСС с учетом целочисленного свойства неоднозначностей обеспечивает случайную погрешность сравнений на

уровне 55 пс и контроль нестабильности опорных генераторов на уровне 4-6Е-16 для суточного интервала усреднения.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Вячеславу Федотову и его коллегам за предоставление файлов измерений приемников GTR51.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Melbourne, W.G.**, The case for ranging in GPS-based geodetic systems, *Proceedings 1st international symposium on precise point positioning with the global positioning system*, 1985, pp. 373–386.
2. **Wubbena, G.**, Software developments for geodetic positioning with GPS using TI-4100 code and carrier measurements, *Proceedings 1st international symposium on precise point positioning with the global positioning system*, 1985, pp. 403–412.
3. **Petit, G., Kanj, A., Loyer, S., Delporte, J., Mercier, F., Perosanz, F.** 1×10^{-16} frequency transfer by GPS PPP with integer ambiguity resolution, *Metrologia*, 2015, vol. 52, no. 2, pp. 301.
4. **Пензин К.В.** Алгоритмы оперативной обработки многоканальных измерений по критерию максимального правдоподобия // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35. № 1. С. 97–106. (**Penzin, K.V.**, Algorithms of online processing of multichannel measurements by the maximum credibility criterion, *Radiotekhnika i elektronika*, 1990, vol. 35, no. 1, pp. 97–106.)
5. **Перов А.И., Харисов В.Н.** ГЛОНАСС: принципы построения и функционирования. М.: Радиотехника, 2010. 800 с. (**Perov, A.I., and Kharisov, V.N.**, *GLONASS: printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* (GLONASS: Principles of Construction and Functioning), Moscow, Radiotekhnika, 2010.)
6. **Поваляев А.А.** Спутниковые радионавигационные системы: время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат. М.: Радиотехника, 2008. 324 с. (**Povalyaev, A.A.**, *Sputnikovyie radionavigatsionnye sistemy: vremya, pokazaniya chasov, formirovaniye izmerenii i opredeleniye odnositel'nykh koordinat* (Radionavigation Satellite Systems: Time, Clock Readings, Measurements Generation, and Determination of Relative Coordinates), Moscow, Radiotekhnika, 2008.)
7. **Yao, J., Skakun I., Jiang, Z., Levine, J.**, A detailed comparison of two continuous GPS carrier-phase time transfer techniques, *Metrologia*, 2015, vol. 52, no. 5, pp. 666.
8. **Defraigne, P., Bruyninx, C.**, On the link between GPS pseudorange noise and day-boundary discontinuities in geodetic time transfer solutions, *GPS Solutions*, 2007, vol. 11, no. 4, pp. 239–249.
9. **Sleewagen, J., Simsky, A., Wilde, W.D., Boon, F., Willems, T.**, Demystifying GLONASS inter-frequency carrier phase biases, *Inside GNSS*, May/June, 2012.
10. **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, p. e273785.
11. **Hanson, D.W.**, Fundamentals of two-way time transfers by satellite. *Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control*, 1989, pp. 174–178.
12. **Hauschild, A., Montenbruck, O.**, The Effect of Correlator and Front-End Design on GNSS Pseudorange Biases for Geodetic Receivers, *Navigation*, 2016, vol. 63, no. 4, pp. 443–453.
13. **Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Waskle, E.**, *GNSS – Global Navigation Satellite Systems*, Vienna: Springer Vienna, 2008.
14. **Laurichesse, D., Mercier, F., Berthias, J.-P., Broca, P., Cerri, L.** Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination, *Navigation*, 2009, vol. 56, no. 2, pp. 135–149.
15. **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.
16. **Teunissen, P.J.G.**, The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation, *Journal of Geodesy*, 1995, vol. 70, no. 1–2, pp. 65–82.
17. **Rost, M., Piester, D., Yang, W., Feldmann, T., Wübbena, T., Bauch, A.**, Time transfer through optical fibres over a distance of 73 km with an uncertainty below 100 ps., *Metrologia*, 2012, vol. 49, no. 6, p. 772.
18. **Verhagen, S.**, The GNSS integer ambiguities: estimation and validation. TU Delft, Delft University of Technology, 2005.

Skakun I., Mitrikas V. (PNT Information and Analysis Center, Central Research Institute of Machine Building, Korolyov City, Russia).

Comparison of Time Scales by Common View Method Based on the Measurements Taken by GLONASS Unmanned Spacecraft and Taking into Account Integer Property of Phase Ambiguities. *Giroskopiya i Navigatsiya*. 2017. Vol. 25. No. 4. P. 95–107.

Abstract. The paper presents the results of experimental research of time scales comparison by a differential method using the signals from global navigation satellite systems (GNSS), which demonstrate the possibility of taking into account the integer property of ambiguities of GLONASS unmanned spacecraft. The obtained value of random error of time scales comparison is about 55 ps.

Key words: GLONASS, phase ambiguity, satellite systems, error, time scale.

Материал поступил 04.05.2017