

## **ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗНЕСЕННЫХ ЧАСОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ГЛОНАСС**

***Александр Сергеевич Толстиков***

Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, начальник ГСВЧ; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)210-11-85, e-mail: tolstikov@mail.kns.ru

***Андрей Сергеевич Томилов***

Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, заместитель начальника ГСВЧ, тел. (383)210-11-85, e-mail: tomler1@yandex.ru

***Анжелика Равильевна Безродных***

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирантка кафедры метрологии и технологии оптического производства, e-mail: a.bezrodnykh@mail.ru

В статье анализируются пути повышения точности синхронизации пространственно-разнесенных часов. Показана эффективность привлечения методологии Precise Point Positioning (PPP) для задач синхронизации. Приведены методы разрешения неоднозначности фазовых измерений.

**Ключевые слова:** частотно-временные измерения, псевдодальномерные фазовые измерения, пространственно-разнесенные часы, методология PPP, фазовая неоднозначность.

## **WAYS TO IMPROVE SYNCHRONIZATION ACCURACY SPATIALLY SEPARATED HOURS ON THE BASIS OF APPLICATIONS GLONASS NAVIGATION SIGNALS**

***Aleksandr S. Tolstikov***

Siberian Research Institute of Metrology, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrova, head SSTF; Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Prof. of Department metrology and optical instrumentation technology, e-mail: tolstikov@mail.kns.ru

***Andrew S. Tomilov***

Siberian Research Institute of Metrology, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrova, the Deputy chief of SSTF, e-mail: tomler1@yandex.ru

***Angelika R. Bezrodnikh***

Siberian State University of Geosystem and Technology, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., graduate department of the Department of metrology and optical engineering technology, e-mail: a.bezrodnykh@mail.ru

The article analyzes the ways to improve timing accuracy spatially separated hours. The effectiveness of the methodology of Precise Point Positioning (PPP) involved for synchronization tasks. The methods of ambiguity resolution phase measurements.

**Key words:** time-frequency measurement pseudodalmomernye phase measurements, spatially separated clocks, methodology PPP phase ambiguity.

Существует большое количество информационно-измерительных систем, в состав которых входят высокостабильные часы. Это системы астрономических наблюдений, системы контроля за движением спутников Земли и космических объектов, навигационные системы наземного и космического базирования, системы контроля синхронно развивающихся геофизических процессов.

Главными особенностями таких систем являются: пространственная разнесенность измерительных устройств с часами и необходимость высокой согласованности хода часов, участвующих в измерениях.

Требования к точности выполняемых измерений и надежности функционирования указанных измерительных систем постоянно растут, что и делают актуальной задачу поиска путей к повышению точности синхронизации часов, участвующих в измерениях.

Для синхронизации пространственно-разнесенных часов в настоящее время широко используются спутниковые навигационные технологии [1-3].

Методы прямой передачи потребителю частотно-временной информации в составе навигационного сообщения частотно-временной информации для точной синхронизации пространственно-разнесенных часов не применяются.

Лучшие результаты дают дифференциальные методы, предполагающие прием в пунктах синхронизации сигналов от "третьих - спутниковых" часов и обмен информацией о результатах приема между этими пунктами. Результаты синхронизации в этом случае зависят от неодинаковости условий прохождения синхронизируемого сигнала по радиотрассам и на зависят от нестабильности этих третьих часов.

Одна из разновидностей этого метода, метод «common view» [3], предполагал одновременный прием навигационных сигналов одного, определенным образом выбранного спутника, в пунктах нахождения синхронизируемых часов. Полученные в каждом пункте результаты измерений подвергались обработке с целью компенсации составляющей псевдодальности, связанной с геометрической дальностью радиотрассы и компенсацией эффектов от ионосферной и тропосферной задержек радиосигнала. Полученные в результате такой обработки результаты содержали информацию о шкале времени выбранного спутника и шкале часов пункта синхронизации. После обмена полученной информацией между пунктами синхронизации из разностей результатов обработки псевдодальномерных измерений каждого пункта непосредственно определялось расхождение шкал времени часов в пунктах синхронизации.

Позднее «common view» трансформировался в метод синхронизации, включающий в обработку данные по всей радиовидимой в каждом пункте в течение суток орбитальной группировке навигационных спутников (НС) [4]. В обмен информацией между пунктами синхронизации представлялись результаты усреднения по всему ансамблю НС. Данный подход, предложенный в 1993 году международной группой CGGTTS по выработке стандарта – Common GPS

GLONASS Time Transfer Standard опирается на использование в качестве исходных данных одночастотных измерений. Для компенсации ионосферной задержки, при GPS наблюдениях, используется модель Клабухара [5].

Дальнейшее повышение точности синхронизации пространственно-разнесенных часов может быть обеспечено за счет привлечения к задачам синхронизации методологии Precise Point Positioning (PPP), изначально ориентированной на координатно-временные определения, является привлекательной для задачи синхронизации шкал времени [2].

Основной выигрыш по точности, согласно этой методологии, достигается за счет использования в качестве исходных данных для синхронизации результатов более точных, по сравнению с кодовыми, фазовых псевдо-дальномерных измерений, применении уточненных эфемерид спутников и уточненных частотно-временных поправок к бортовым часам.

Уравнения беззапросных кодовых и фазовых измерений имеют вид:

$$D^A(t) = \rho(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_{RA}) + \Delta T_{SR}(t) \cdot c + \tau_{ion}(t) \cdot c + \sum_{i=1}^N p_{iA}(t), \quad (1)$$

$$\varphi^A(t) = \rho(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_R) + \Delta T_{SR}(t) \cdot c - \tau_{ion}(t) \cdot c + K \cdot \lambda + \sum_{i=1}^N p_{iA}(t), \quad (2)$$

где  $D^A(t)$  и  $\varphi^A(t)$  – измеренные на момент прихода навигационного сигнала на приемную антенну в одном из пунктов синхронизации А кодовые и фазовые псевдодальности, выраженные в единицах длины;

$\rho(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_{RA}) = \sqrt{(x_S - x_{RA})^2 + (y_S - y_{RA})^2 + (z_S - z_{RA})^2}$  – геометрическая дальность от передающей антенны спутника до приемной антенны потребителя в пункте А;

$\mathbf{u}_S^T = x_S, y_S, z_S$  – вектор координат НС ГЛОНАСС в системе координат ПЗ 90;

$\mathbf{u}_{RA}^T = x_{RA}, y_{RA}, z_{RA}$  – вектор координат антенного модуля пункта А;

$\Delta T_{SR}^A(t) = \Delta T_S(t) + \Delta T_R^A(t)$  – суммарное расхождение бортовой и наземной в пункте А

шкал относительно системного времени;  $\lambda$  – длина волны несущей с литерной частотой, на которой передаётся навигационный сигнал;  $K$  – целое неопределённое число длин волн, укладываемых в измеренном расстоянии,  $c$  – скорость распространения навигационного сигнала в вакууме;  $\tau_{ion}(t) \cdot c$  – задержка

навигационного сигнала в ионосферном слое;  $\sum_{i=1}^N p_i^A(t)$  – факторы, влияющие на

точность псевдодальномерных измерений, к которым относятся выраженные в единицах длины задержки навигационного сигнала в тропосферном слое, поправки за релятивистские эффекты, смещения фазовых центров антенных модулей, аномальные значения, связанные с многолучевостью распространения навигационного сигнала, неучтенные задержки в радиотрактах передающей и приемной аппаратуры, погрешности измерений и другие факторы.

Для сравнения шкал времени из результатов кодовых и фазовых измерений должны быть выделены составляющие  $\Delta T_{SR}^A(t)$ . С этой целью к результатам

измерений добавляются компенсирующие поправки - рассчитанные оценки геометрической дальности  $\hat{\rho}(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_{RA})$  и оценки доминирующих факторов  $\hat{p}_i^A(t)$ .

Полученные таким образом уравнения для расчета оценок  $\Delta\hat{T}_{SR}^A(t)$  на основе кодовых (1) и фазовых (2) измерений в пункте  $A$  приобретают вид

$$\Delta D^A(t) = D^A(t) - \hat{\rho}(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_{RA}) - \sum_{i=1}^N \hat{p}_i^A(t) = \hat{T}_{SR}^A(t) \cdot c + \tau_{ion}(t) + \delta_{AD}, \quad (3)$$

$$\Delta\varphi^A(t) = \varphi^A(t) - \hat{\rho}(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_{RA}) - \sum_{i=1}^N \hat{p}_i^A(t) = \hat{T}_{SR}^A(t) \cdot c + \hat{K}^A \cdot \lambda - \tau_{ion}(t) + \delta_{A\varphi}. \quad (4)$$

Расчет оценок  $\Delta\hat{T}_{SR}^A(t)$  и  $\Delta\hat{T}_{SR}^B(t)$ , подлежащих обмену между пунктами дислокации сравниваемых часов  $A$  и  $B$ , производится для каждой пары измерений  $D(t)$  и  $\varphi(t)$  путем решения системы алгебраических уравнений (3) и (4). С учетом равенства  $T_{SR}(t) = T_S(t) + T_R(t)$  при обмене информацией между пунктами  $A$  и  $B$  из разностей  $\hat{T}_{SR}^A(t) - \hat{T}_{SR}^B(t)$  непосредственно получаются разности оценок шкал времени сравниваемых часов

$$\hat{T}_R^{A-B}(t) = \hat{T}_{SR}^A(t) - \hat{T}_{SR}^B(t). \quad (5)$$

Повышение точности и достоверности оценок  $\hat{T}_R^{A-B}(t)$  расхождения шкал времени часов в пунктах  $A$  и  $B$  достигается при обмене протоколами измерений CGGTTS, полученных в этих пунктах. В этом случае используется вся радиовидимая в течении суток орбитальная группировка НС [6].

Аналогичный алгоритм осуществляется для оценивания уходов шкал времени нескольких навигационных спутников, сигналы которых принимаются одной наземной станцией.

Основная трудность при решении рассматриваемой системы уравнений связана с задержкой сигнала в ионосфере, которая входит в уравнения (3) и (4) с противоположными знаками – поправка к кодовой псевдодальности отрицательная, в то время как к фазе - положительная. В силу этого при определении фазовой неоднозначности из разности кодовых и фазовых измерений, в число неизвестных входит и удвоенная ионосферная задержка. В соответствии с вышеизложенными для решения системы уравнений целесообразно представлять ионосферную задержку в качестве параметрической модели, на основе которой и рассчитываются поправки рассматриваемого фактора.

Проблема разрешения фазовой неоднозначности решается путем компенсации ионосферной задержки за счёт применения двухчастотных фазовых псевдодальномерных измерений.

При обработке двухчастотных измерений используется свойство частотной зависимости ионосферной задержки. Для формирования линейных комбинаций кодовых фазовых измерений, так называемая безионосферная комбинация  $D_3(t)$  и  $\varphi_3(t)$  [2]

$$D_3(t) = \rho(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_{RA}) + \Delta T_{SR}(t) \cdot c + \sum_{i=1}^N p_{iA}(t), \quad (6)$$

$$\varphi_3(t) = \rho(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_R) + \Delta T_{SR}(t) \cdot c - K \cdot \lambda + \sum_{i=1}^N p_{iA}(t), \quad (7)$$

где

$$D_3 = \frac{(77^2 D_1 - 60^2 D_2)}{(77^2 - 60^2)}; \varphi_3 = \frac{(77^2 \varphi_1 - 60^2 \varphi_2)}{(77^2 - 60^2)}, \quad (8)$$

и число циклов для безионосферной комбинации равно  $K_3 = 77K_1 - 60K_2$ .

Эквивалентная длина волны (см) безионосферной комбинации

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{77\lambda_2 - 60\lambda_1} \approx 0,63. \quad (9)$$

Формируя первые разности по станциям получим:

$$\begin{aligned} \Delta D_3 &= \Delta \rho(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_R) + \Delta T_R(t) \cdot c + \sqrt{2} \sum_{i=1}^N p_{D_3}(t), \\ \Delta \varphi_3 &= \Delta \rho(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_R) + \Delta T_R(t) \cdot c + K_3 \cdot \lambda_3 + \sqrt{2} \sum_{i=1}^N p_{\varphi_3}(t). \end{aligned} \quad (10)$$

Используя соотношения фазовых измерений

$$K_3 \cdot \lambda_3 = \lambda_3(77K_1 - 60K_2) = \lambda_3(17K_1 + 60K_4) = \lambda_6 K_1 + 60K_4 \cdot \lambda_3, \quad (11)$$

получаем

$$\Delta \varphi_3 = \Delta \rho(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_R) + \Delta T_R(t) \cdot c + \lambda_6 K_1 + 60 \cdot \Delta K_4 \cdot \lambda_3 + \sqrt{2} \sum_{i=1}^N p_{\varphi_3}(t), \quad (12)$$

где  $\Delta K_4$  - разность неизвестного числа циклов для двух станции для широкой комбинации [7].

Повышение точности синхронизации пространственно разнесенных часов на основе применения навигационных сигналов ГЛОНАСС обеспечивается за счет применения фазовых измерений, как более точных по сравнению с кодовыми.

При этом возникает необходимость в предварительной подготовке исходных данных кодовых и фазовых измерений. В режиме обработки данных по каждому треку необходимо исключение аномальных данных, связанных с многолучевостью прохождения навигационного сигнала.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Проблемы обеспечения точности координатно-временных определений на основе применения ГЛОНАСС технологий / А. С. Толстикова, В. А. Ащеулова, К. М. Антонович, Ю. В. Сурнин // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 2 (18). – С. 3–11.

2. Сличение шкал времени с использованием сигналов ГНСС в режиме Common View с разрешением фазовых неоднозначностей / И. О. Скакун, В. В. Митрикас // Полет. - 2014. - № 1. - С. 50-57.
3. Юношев Л.С. О сличении эталонов времени по сигналам навигационных спутников. // Измерительная техника. – 1994. – № 7. – С. 30–33.
4. Defraigne P., Bruyninx C. Time Transfer for TAI using a geodetic receiver, An Example with Ashtech ZXII-T. // GPS Solutions. – 2001. – № 5. – P. 43-50.
5. Использование спутниковой радионавигационной системы NAVSTAR для синхронизации шкал времени / И.А. Новиков, В.С. Рабкин, С.В. Филатченков, А.А. Шебанов, В.С. Шебшаевич // Зарубежная радиоэлектроника. – 1987. – № 11. – С. 3-15.
6. Толстиков А. С., Безродных А. Р. Синхронизация пространственно-разнесенных часов на основе псевдодальномерных фазовых измерений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 2. – С. 36–40.
7. 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.

© А. С. Толстиков, А. С. Томилов, А. Р. Безродных, 2015