

УДК 62–83: 531.3

К ЗАДАЧЕ КОНТРОЛЯ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ НАВИГАЦИОННОГО ПОЛЯ ГЛОНАСС

Толстиков Александр Сергеевич,

д-р техн. наук, профессор каф. систем сбора и обработки данных
Факультета автоматизации и вычислительной техники Новосибирского
государственного технического университета, Россия, 630073,
г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: tolstikov@mail.kns.ru

Ханыкова Екатерина Андреевна,

науч. сотр. Государственной службы времени, частоты и определения
параметров вращения Земли ФГУП «Сибирский ордена Трудового
Красного Знамени научно-исследовательский институт метрологии»,
Россия, 630004, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4. E-mail: hanikovak@mail.ru

Для пользователей, выполняющих работы в области геологии, геодинимики, разведки и добычи природных ископаемых, разработки нефтяных и газовых месторождений на участках прибрежных шельфов, перспективным направлением является использование высокоточных навигационных измерений. Требования этого круга специальных потребителей к точности и качеству навигационно-временного обеспечения постоянно возрастают. Повышение точности и надежности навигационных измерений можно достичь путем решения задачи контроля параметров нестабильности бортовых часов навигационных спутников системы ГЛОНАСС, что делает данную работу актуальной.

Цель работы: оценивание параметров нестабильности бортовых часов орбитальной группировки ГЛОНАСС, в значительной степени определяющих качество и достоверность координатно-временных измерений на основе спутниковых навигационных технологий.

Методы исследования: метод исключения ионосферной задержки по двухчастотным измерениям, метод оценивания фазовой неоднозначности, метод Х. Хопфилда для компенсации тропосферной задержки, метод статистического оценивания уходов бортовых часов навигационных спутников по результатам траекторных измерений.

Результаты. Предложен метод оценивания уходов бортовых часов навигационных спутников ГЛОНАСС на базе программно-аппаратного комплекса метрологического пункта Государственной службы времени и частоты Сибирского ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института метрологии «СНИИМ». Основное внимание уделено использованию в качестве исходной информации в алгоритмах оценивания фазовых псевдодальномерных измерений. Выделяются и описываются характерные особенности использования таких измерений, в частности, проблема разрешения фазовой неоднозначности. Также для получения высокоточных результатов авторы привлекали алгоритмы предварительной обработки псевдодальномерных измерений с целью снижения уровня шума, применения компенсирующих поправок к ионосферной и тропосферной задержкам навигационного сигнала. Результатами исследований являются оценки уходов бортовых шкал времени орбитальной группировки ГЛОНАСС и статистические характеристики погрешностей представления этих шкал с помощью частотно-временных поправок. Также достоинством разработанного метода является достижение высокой точности за счет использования государственного вторичного эталона времени, частоты и момента шкалы ВЭТ 1–19. Полученные авторами оценки составляют основу для контроля частотно-временных параметров навигационного поля ГЛОНАСС, что является одной из задач метрологического пункта Государственной службы времени и частоты.

Выводы. Авторы предлагают использование методики контроля частотно-временных параметров навигационного спутника ГЛОНАСС в целях повышения точностных характеристик корректирующих поправок, формируемых сетью активных базовых наземных станций Новосибирской области.

Ключевые слова:

Разведка и добыча природных ископаемых, разработка нефтяных и газовых месторождений, бортовые шкалы времени, координатно-временные определения, траекторные фазовые измерения, ГЛОНАСС, фазовая неоднозначность, частотно-временные поправки, нестабильность частоты генератора часов, ГНСС.

Введение

В настоящее время спутниковые навигационные технологии всё больше применяются во многих отраслях экономики РФ. Специалистам, выполняющим работы в области геологии, исследования природных ресурсов [1], добычи и разработки нефтяных и газовых месторождений на участках прибрежных шельфов [1, 2], а также управления транспортом, требуются высокоточные измерения. Требования этого круга специальных потребителей к точности и качеству навигационно-временного обеспечения постоянно возрастают. Повы-

шение точности этих измерений можно достичь за счёт модернизации отечественной навигационной системы ГЛОНАСС, совершенствования существующих и привлечения новых измерительных технологий.

Точность и надежность координатно-временных определений (КВО) на основе применения спутниковых навигационных технологий существенным образом зависит от качества частотно-временного обеспечения глобальной спутниковой навигационной системы (ГНСС). Это связано с тем обстоятельством, что все измерения дальностей от

навигационных спутников до потребителя сводятся к измерениям интервалов времени, необходимых для прохождения навигационного сигнала от передающей антенны спутника до приемной антенны потребителя.

Измерения указанных интервалов времени производятся относительно действительных моментов шкалы бортовых часов, а отсчет измеренных интервалов в аппаратуре потребителя происходит от моментов аналитической шкалы времени, рассчитанной с помощью частотно-временных поправок (ЧВП), транслируемых в составе навигационного сигнала. Возрастающие требования к точности позиционирования на основе ГНСС технологий делают актуальной задачу контроля правильности представления положений бортовых шкал времени с помощью ЧВП [3–7].

В работе описана организация контроля согласованности бортовых и аналитических шкал времени орбитальной группировки навигационных спутников ГЛОНАСС по данным беззапросных фазовых измерений в условиях применения эталона времени и частоты ВЭТ 1–19 ФГУП «СНИИМ».

Постановка задачи контроля

Исходными данными для решения задач КВО в сегменте потребителя ГНСС являются результаты псевдодалномерных фазовых измерений по каждому спутнику $\varphi(t) = N(t)\lambda$, связанных с геометрической дальностью $\rho(\mathbf{u}_s, \mathbf{u}_r)$ уравнением измерений

$$\varphi(t) = \rho(\mathbf{u}_s, \mathbf{u}_r) + [\Delta T_s(t) + \Delta T_r(t)]c + K\lambda + \sum_{i=1}^n q_i(t),$$

в котором $N(t)$ – измеренное число периодов несущей частоты, укладываемой на радиотрассу от спутника до потребителя; λ – длина волны несущей; $\rho(\mathbf{u}_s, \mathbf{u}_r)$ – геометрическая дальность от передающей антенны спутника с координатами $\mathbf{u}_s^T = [x_s(t), y_s(t), z_s(t)]$ до приемной антенны потребителя с координатами $\mathbf{u}_r^T = [x_r(t), y_r(t), z_r(t)]$;

$\Delta T_s(t) = \Delta T_{s\phi}(t) - \Delta T_{sa}(t)$ – отклонения момента бортовой шкалы времени $\Delta T_{s\phi}(t)$ от момента шкалы Центрального синхронизатора ГНСС $T(t)$ после коррекции этого момента с помощью аналитической шкалы $\Delta T_{sa}(t)$, рассчитанной с применением бортовых ЧВП; $\Delta T_r(t)$ – отклонение момента шкалы времени приемника от шкалы Центрального синхронизатора ГНСС; c – скорость распространения радиосигнала; K – неопределенное целое число периодов частоты несущей, связанное с неоднозначностью фазовых измерений; $q_i(t)$ – факторы, влияющие на точность фазовых псевдодалномерных измерений, к которым относятся задержки навигационного сигнала в ионосферном и тропосферном слоях, неучтенные задержки навигационного сигнала в передающих и приемных радиотрактах аппаратуры, эффекты от многолучевости распространения навигационного сигнала, релятивистские эффекты и другие влияющие факторы [3, 6–12].

Возникновение погрешностей псевдодалномерных фазовых измерений от несогласованности положений моментов действительной $\Delta T_{s\phi}(t)$ и аналитической $\Delta T_{sa}(t)$ бортовых шкал времени иллюстрируется рис. 1, где приведены: шкала времени центрального синхронизатора ГНСС $T_{\text{ЦС}}$, бортовая шкала T_s и шкала потребителя T_r .

Видно, что фактические уходы шкал времени бортовых часов $\Delta T_s(t)$ и уходы шкалы времени часов потребителя $\Delta T_r(t)$ от моментов шкалы времени центрального синхронизатора ГНСС, связанных с моментом излучения навигационного сигнала T_A и момента прихода этого сигнала к потребителю T_B , приводят к возникновению погрешности измерения интервала времени $\Delta\tau = \tau^* - \tau$, который является мерой геометрической дальности $\rho(\mathbf{u}_s, \mathbf{u}_r)$.

Тенденции к уходам шкал времени часов от эталонных шкал определяются нестабильностями частоты генераторов этих часов. Величина ухода шкал $\Delta T(t)$ связана с относительной нестабильностью частоты генератора часов $\omega(t) = \Delta f(t)/f(t)$ диф-

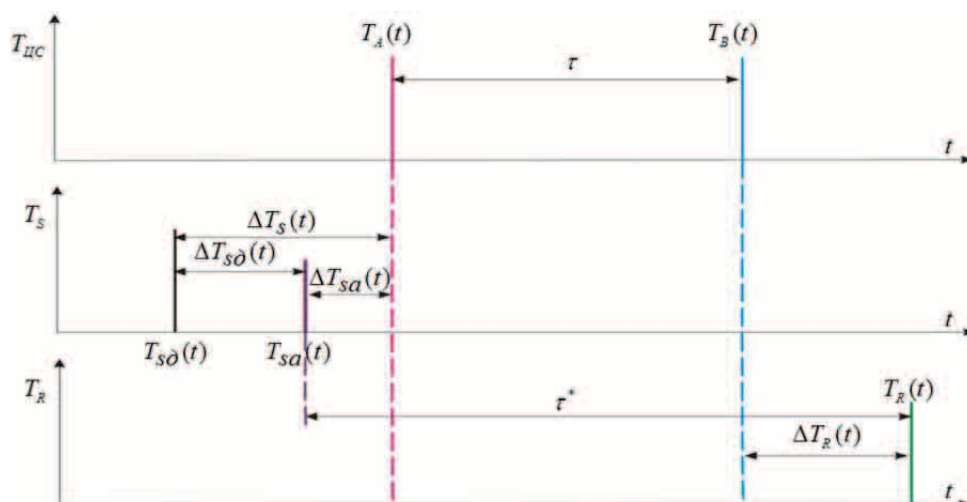


Рис. 1. Возникновение погрешностей от несогласованности действительной и аналитической бортовых шкал времени

Fig. 1. Occurrence of errors due to inconsistency of real and analytical onboard timescales

ференциальным уравнением $\Delta\dot{T}(t)=\omega(t)$, $\Delta T(0)$, которое является математической моделью нестабильности часов. Частотно-временные поправки, предназначенные для компенсации уходов бортовых часов, представляют собой оценки параметров $\Delta T(k)$ и $\omega(k)$ некоторой упрощенной математической модели нестабильности часов, транслируемые потребителю каждые 30 минут [3, 13]. Точность такой компенсации зависит от адекватности использованной математической модели нестабильности часов и точности оценивания параметров этой модели.

Задача текущего контроля согласованности бортовой и аналитической шкалы времени сводится к текущему оцениванию положения бортовой шкалы $T_s(t)$ по данным псевдодалномерных фазовых измерений $\varphi(t)$. При этом требуется предварительная подготовка этих данных за счет компенсации с достаточной точностью в уравнении измерений составляющих $\rho(u_s, u_R)$, $c\Delta T_R(t)$, $K\lambda$, $q_i(t)$ [14–21].

Результаты контроля

Контроль бортовых шкал времени орбитальной группировки ГНСС организован в пункте метрологического контроля Государственной службы времени и частоты «СНИИМ». Использовался аппаратный комплекс эталона времени и частоты ВЭТ 1–19 и прецизионная аппаратура приема спутниковых навигационных сигналов ГНСС ГЛОНАСС и GPS, антенные модули которой установлены на пунктах с известными с высокой точностью в системе ITRF координатами. Это обеспечило высокоточное оценивание $\rho(u_s, u_R)$ и применение в качестве опорной эталонной шкалы времени, для которой $\Delta T_R(t) \equiv 0$.

В качестве методической основы для рассматриваемой задачи применена технология Precise Point Positioning (PPP) [18, 20], использующая в качестве исходных данных высокоточные фазовые псевдодалномерные измерения и опирающаяся на высокоточные апостериорные эфемеридно-временные данные. Также в работе использовалась компенсация ионосферных и тропосферных задержек с помощью соответствующих математических моделей этих задержек и разрешение фазовых неоднозначностей измерений [14, 15].

Разработаны алгоритмы и соответствующие им программные приложения для текущего оценивания бортовых шкал времени навигационных спутников ГЛОНАСС. Проведены эксперименты по расчету бортовых шкал времени и оценке погрешностей представления этих шкал времени с помощью ЧВП. Для оценивания использовались результаты псевдодалномерных фазовых измерений в формате RINEX, полученные с помощью аппаратуры JAVAD 02.09.2014 г. с привлечением бортовой эфемеридной информации.

На рис. 2 видно, что действительные значения момента шкалы времени спутника R123 отклоня-

ются относительно соответствующих им значений аналитической шкалы (кусочно-линейная функция), что говорит об ошибочном оценивании частоты генератора бортовых часов спутника. Для R115 неверно введена коррекция момента шкалы времени. Исправить положение может применение дополнительных частотно-временных поправок, рассчитанных в условиях применения аппаратуры эталона ВЭТ 1–19.

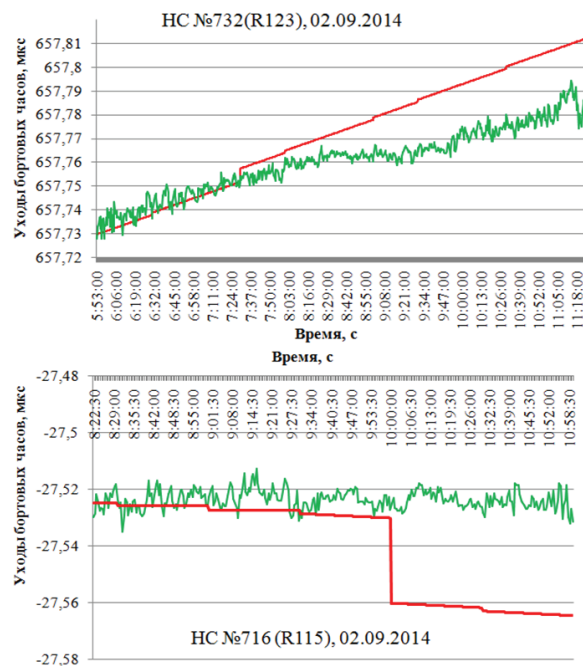


Рис. 2. Поведение действительной и аналитической шкалы времени навигационных спутников ГЛОНАСС R723 и R716

Fig. 2. Behavior of real and analytic timescales of the navigation satellite GLONASS R723 and R716

Результаты экспериментов показали хорошую согласованность с результатами оценивания таких погрешностей, приведенных в бюллетенях системы высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП) [13].

На рис. 3 приведены в виде диаграмм результаты контроля всей орбитальной группировки навигационных спутников ГЛОНАСС по данным фазовых измерений, полученных в метрологических пунктах Государственной службы времени и частоты в г. Новосибирск, Москва и Иркутск.

Проведенный анализ показал, что точность результатов контроля бортовых шкал может быть повышена за счет:

- применения алгоритмов предварительной обработки результатов измерений с целью фильтрации шумов и качественного подавления влияющих факторов;
- привлечения результатов фазовых измерений;
- использования апостериорных эфемерид для расчетов геометрических дальностей от спутников до антенн метрологического пункта.

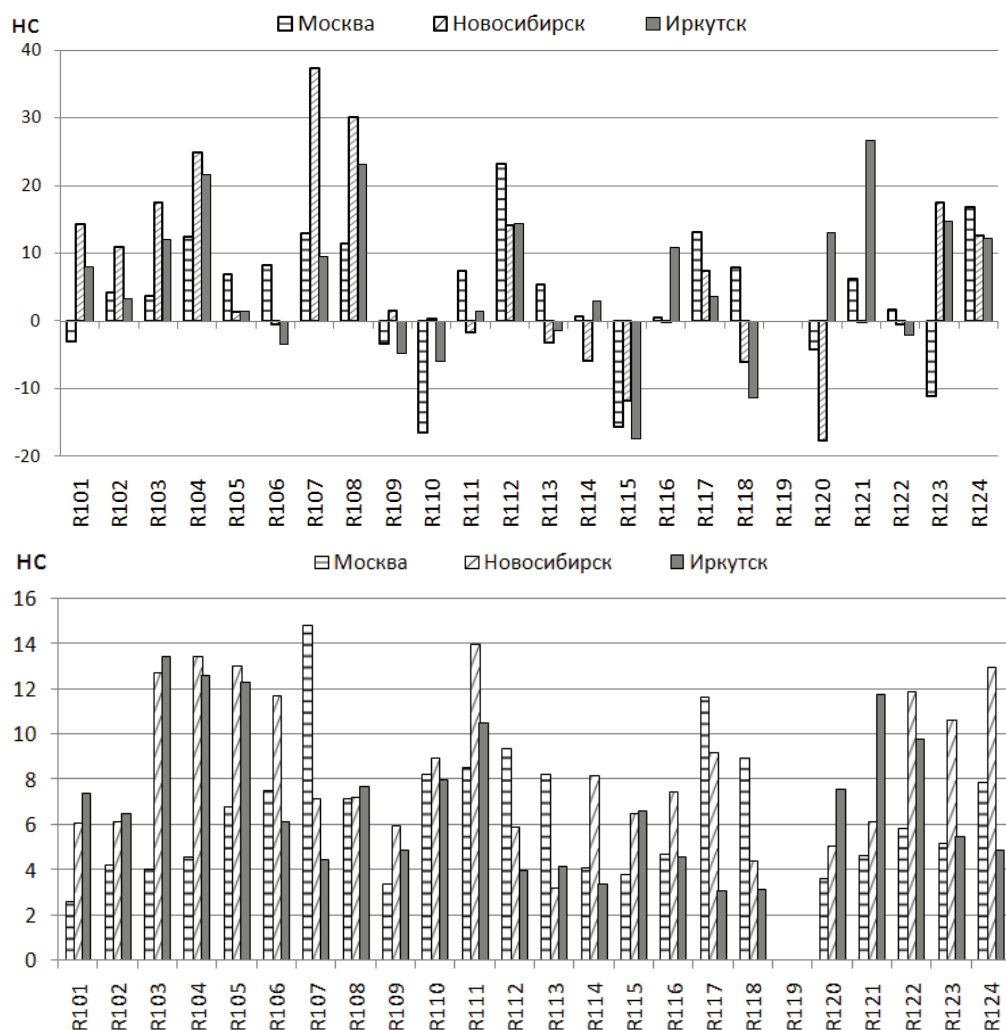


Рис. 3. Диаграммы оценок математических ожиданий и СКО погрешностей представления бортовых шкал времени с помощью частотно-временных поправок (в нс)

Fig. 3. Diagrams of mathematical expectations evaluations and standard deviation of errors of onboard timescale by the time-frequency correction (ns)

Заключение

Предложена методика контроля текущих параметров отклонения бортовых шкал времени навигационных спутников от эталонных шкал по результатам траекторных фазовых измерений в частотных диапазонах ГЛОНАСС L1 и L2. Эффективность оценок положения бортовых шкал достигнута за счет применения технологии PPP.

Сложность реализации методики заключалась в том, что фазовые измерения содержат неоднозначности, а также существует вероятность потери

фазовых циклов и, вследствие этого, появления скачков значений фазы несущей. Однако фазовые измерения обеспечивают увеличение точности оценивания уходов бортовых часов по сравнению с кодовыми.

Результаты контроля бортовых шкал времени орбитальной группировки ГНСС на базе метрологического пункта Государственной службы времени и частоты «СНИИМ» позволяют улучшить метрологические характеристики корректирующих поправок, формируемых сетью активных базовых станций Новосибирской области [22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ростовцев В.В., Ростовцев В.Н. Увеличение темпов прироста запасов углеводородов с помощью инновационных технологий на примере Омской области // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 34–39.
2. Краснаярова Н.А., Яценко И.Г., Серебренникова О.В. Распределение вязких и парафинистых нефтей по площади и разрезу отложений юго-востока Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 2. – С. 70–79.
3. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС (Редакция 5.1). – Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения, 2008. – 74 с.
4. Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования // под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
5. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В.С. Шебшаевич, П.П. Дмитриев, Н.В. Иванцевич и др. // под ред. В.С. Шебшаевича. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.
6. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 2. Монография. – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – 334 с.
7. Генике А.А., Побединский Г.Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применения в геодезии. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Картгеоцентр, 2004. – 335 с.
8. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 272 с.
9. Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS. – М.: Техносфера, 2002. – 400 с.
10. Управление и навигация искусственных спутников Земли на околокруговых орбитах // М.Ф. Решетнев, А.А. Лебедев, В.А. Бартенева и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 336 с.
11. Поваляев А.А. Спутниковые радионавигационные системы: время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат. – М.: Радиотехника, 2008. – 328 с.
12. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление // В.В. Малышев, М.Н. Красильщиков, В.Т. Бобронников, О.П. Нестеренко, А.В. Федоров / под ред. В.В. Малышева. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 568 с.
13. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. Система высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП) (Редакция 3.0). – ОАО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», 2010. – 93 с.
14. Скакун И.О., Митрикас В.В. Сличение шкал времени с использованием сигналов ГНСС в режиме Common View с разрешением фазовых неоднозначностей // Полет. – 2014. – № 1. – С. 50–57.
15. Blewitt G. Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2000 km // Journal of Geophysical Research. – 1989. – V. 96. – № B8. – P. 187–203.
16. Melbourne W.G. The case for ranging in GPS based geodetic systems // In Proceeding of the First Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Positioning with GPS. – U.S. Dept. of Commerce, Rockville, MD, 1985. – P. 373–386.
17. Wiibbena G. Software developments for geodetic positioning with GPS using TI-4100 code and carrier measurements // In Proceedings of the First Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Positioning with GPS-1985. – Rockville, Maryland, April 15–19, vol. 1, 1985. – P. 403–412.
18. Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution using the Decoupled Clock Model / P. Collins, F. Lahaye, P. Hirioux, S. Bisnath // Proceedings of ION-GNSS-2008. – Savannah, Georgia, 16–19 September, 2008. – P. 1315–1322.
19. Алгоритмические пути повышения точности и достоверности частотно-временного обеспечения на основе ГНСС-технологий / Е.А. Ханыкова и др. // Актуальные проблемы электронного приборостроения: Труды XII Междунар. конф. В 7 т. Т. 3. – Новосибирск: НГТУ, 2014. – С. 54–59.
20. Использование псевдодальномерных фазовых измерений для сравнения шкал времени пространственно-разнесённых часов / Е.А. Ханыкова и др. // Современные проблемы радиоэлектроники: Матер. Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Красноярск, 6–8 мая, 2014 г. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2014. – С. 259–263.
21. Оценивание эфемеридно-временных параметров орбитальной группировки ГЛОНАСС / А.С. Толстиков и др. // СибОптика-2014: сб. матер. Междунар. науч. конф. В 2 т. Т. 2. – Новосибирск: СГГА, 2014. – С. 8–13.
22. О метрологическом обеспечении сети активных базовых ГНСС-станций Новосибирской области / А.С. Толстиков, Е.А. Ханыкова, А.А. Карауш, А.Р. Безродных // Приборы. – 2014. – № 9 (171). – С. 34–38.

Поступила 25.03.2015 г.

ON THE ISSUE OF CONTROLLING THE TIME-FREQUENCY PARAMETERS OF GLONASS NAVIGATION FIELD

Aleksandr S. Tolstikov,

Novosibirsk State Technical University, 20, Karla Marksa Avenue,
Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: tolstikov@mail.kns.ru

Ekaterina A. Khanykova,

Siberian Research Institute of Metrology, 4, Dimitrova Avenue, Novosibirsk,
630004, Russia. E-mail: hanikovak@mail.ru

For users who work in the field of geology and geodynamics, exploration and production of natural resources, development of oil and gas fields in the areas of coastal shelves, the use of high-precision navigation measurements is the promising direction. The requirements of this circle of special consumers to the accuracy and quality of navigation-time support is constantly increasing. Increase in accuracy and reliability of navigation measurements can be achieved by solving the problem of controlling the parameters of instability of on-board clocks in navigation satellite systems GLONASS, that makes this work relevant.

The main aim of the study is to estimate the instability parameters of onboard clocks GLONASS constellation, determining to a large extent the quality and accuracy of coordinate-time definitions based on satellite navigation technology.

The methods used in the study: method of excepting ionospheric delay by dual-frequency measurements, method for estimating the phase ambiguity, H. Hopfield method to compensate the tropospheric delay, method of statistical estimation of navigation clock setoff in the board satellites by the results of trajectory measurements.

The results. The authors have proposed the method for estimating the setoff of onboard clock of navigation satellite GLONASS on the basis of hardware-software complex of metrological point at the State service of time and frequency at the Research Institute of Metrology «SNIIM». The authors pay the main attention to the use of phase pseudo-distance measurements in estimation of the algorithm as the background information. The typical features of application of such measurements, in particular, the problem of phase ambiguity solution, are selected and described. To obtain the high-precision results, the authors used the algorithms for pre-processing the pseudo-distance measurements to reduce the noise level, use of compensatory amendments to ionospheric and tropospheric delays of a navigation signal. The results of the research are the estimates of onboard time scales offset of the GLONASS constellation and statistical characteristics of the scales representation errors using time-frequency corrections. The advantage of the method is the achievement of high precision due to the use of public secondary standard time, frequency and the time scale VET 1–19. The assess obtained by the authors make the basis for controlling time-frequency parameters of GLONASS navigation field, that is one of the tasks of the State Service for metrological point of time and frequency.

The conclusions. The authors propose to use the methods for controlling time-frequency parameters of the GLONASS satellite navigation in order to improve precision characteristics of corrective amendments formed by the network of active base ground stations in Novosibirsk region.

Key words:

Exploration and production of natural resources, development of oil and gas fields, on-board timescales, coordinate-time definition, phase trajectory measurement, GLONASS, phase ambiguity, time-frequency correction, instability of clock generator frequency, GNSS.

REFERENCES

1. Rostovtsev V.V., Rostovtsev V.N. Uvelichenie tempov prirosta uglevodorodov s pomoshchyu innovatsionnykh tekhnologiy na primere Omskoy oblasti [The increase in the rate of growth of hydrocarbon reserves through innovative technologies on an example of Omsk region]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 34–39.
2. Krasnoyarova N.A., Yashchenko I.G., Serebrennikova O.V. Raspredelenie vyazkikh i parafinistnykh neftey po ploshchadi i razmery otlozheniy yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri [Area and cross-section distribution of viscous waxy oils in deposits located in the southeast of Western Siberia]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 2, pp. 70–79.
3. GLONASS Interfeysnyy kontrolnyy dokument (Versiya 5.1) [GLONASS Interface Control Document (Version 5.1)]. *Rossiiskiy nauchno-issledovatel'skiy institut kosmicheskogo priborostroeniya*, 2010. 74 p.
4. Perov A.I., Kharisov V.N. GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya [GLONASS. Principles of construction and operation]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010. 800 p.
5. Shebshaevich V.S. Setevye sputnikovye radionavigatsionnye sistemy [Network satellite radio navigation system]. Moscow, Radio i Svyaz Publ., 1993. 408 p.
6. Antonovich K.M. *Ispolzovanie sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem v geodezii* [The use of satellite navigation systems in geodesy]. Moscow, Kartgeotsentr, 2005. 334 p.
7. Genike A.A., Pobedinskiy G.G. *Globalnye sputnikovye sistemy opredeleniya mestopologeniya i ikh primeneniya v geodezii* [Global satellite positioning system mestoplozheniya and their applications in geodesy]. Moscow, Kartgeotsentr Publ., 2004. 335 p.
8. Yatsenkov V.S. *Osnovy sputnikovoy navigatsii. Sistemy GPS NAVSTAR i GLONASS* [Fundamentals of satellite navigation. System of GPS NAVSTAR and GLONASS]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2005. 272 p.
9. Oduan K., Gino B. *Izmerenie vremeni. Osnovy GPS* [Time measurement. Basics of GPS]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2002. 400 p.
10. Reshetnev M.F. *Upravlenie i navigatsiya iskusstvennykh sputnikov Zemli na okolostrukovyykh orbitakh* [Control and navigation of satellites on circular orbits]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 336 p.
11. Povalyaev A.A. *Sputnikovye radionavigatsionnye sistemy: vremya, pokazaniya chasov, formirovaniye izmereniy i opredeleniye ot-nositelnykh koordinat* [Satellite navigation system: time, clock, formation measurements and determination of relative coordinates]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2008. 328 p.
12. Malyshev V.V., Krasilshchikov M.N., Bobronnikov V.T., Nesterenko O.P., Fedorov A.V. *Sputnikovye sistemy monitoringa. Ana-*

- liz, sintez i upravlenie* [Satellite Monitoring System. Analysis, synthesis and management]. Moscow, MAI Press, 2000. 568 p.
13. Interfeysny kontrolny dokument GLONASS. Sistema vysokotochnogo opredeleniya efemerid i vremennykh popravok (SVO-EVP) (Redaktsiya 3.0) [GLONASS Interface Control Document. The system of high-precision ephemeris and time corrections (SVOEVP) (Version 3.0)]. *Scientific and Production Corporation «Precision Instrumentation Systems»*, 2010. 93 p.
14. Skakun I.O., Mitrikas V.V. Slichenie shkal vremeni s ispolzovaniem signalov GNSS v pezhime Common View s razresheniem fazovykh neodnoznachnostey [Comparison of time scales using GNSS signals in Common View mode with a resolution of ambiguities]. *Polet*, 2014, no. 1, pp. 50–57.
15. Blewitt G. Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2000 km. *Journal of Geophysical Research*, 1989, vol. 96, no. B8, pp. 187–203.
16. Melbourne W.G. The case for ranging in GPS based geodetic systems. In *Proc. of the First Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Positioning with GPS*. U.S. Dept. of Commerce, Rockville, MD, 1985. pp. 373–386.
17. Wiibbena G. Software developments for geodetic positioning with GPS using TI-4100 code and carrier measurements. In *Proc. of the First Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Positioning with GPS-1985*. Rockville, Maryland, April 15–19, vol. 1, 1985. pp. 403–412.
18. Collins P., Lahaye F., Hiaroux P., Bisnath S. Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution using the Decoupled Clock Model. *Proc. of ION-GNSS-2008*. Savannah, Georgia, 16–19 September, 2008. pp. 1315–1322.
19. Khanykova E.A. Algoritmicheskie puti povysheniya tochnosti i dostovernosti chastotno-vremennogo obespecheniya na osnove GNSS-tehnologii [Algorithmic ways to improve the accuracy and reliability of time-frequency software-based GNSS technology zone]. *Trudy XII Mezhdunarodnoy konferentsii. Aktualnye problemy elektronnoy priborostroeniya* [12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings]. Novosibirsk, October 2–4, 2014. Vol. 7, no. 3, pp. 54–59.
20. Khanykova E.A. Ispolzovanie psevdodalnomernykh fazovykh izmereniy dlya sravneniya shkal vremeni prostranstvenno-raznennykh chasov [Using pseudo-distance phase measurements for comparison of time scales of space-spaced clocks]. *Sovremennye problemy radioelektroniki: materialy* [Modern problems of radio electronics]. Krasnoyarsk, May 6–8, 2014. pp. 259–263.
21. Tolstikov A.S., Khanikova E.A., Karaush A.A. Otsenivanie efemeridno-vremennykh parametrov orbitalnoy gruppirovki GLO-NASS [Evaluation of ephemeris and time parameters of GLO-NASS constellation]. *SibOptika-2014. Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [SibOptika-2014. Proc. of the International scientific conference]. Novosibirsk, April 8–18, 2014. Vol. 2, pp. 8–13.
22. Tolstikov A.S., Khanikova E.A., Karaush A.A., Bezrodnikh A.R. O metrologicheskom obespechenii seti aktivnykh bazovykh GNSS-stantsii Novosibirskoy oblasti [On metrological support of active GNSS base stations network in Novosibirsk Region]. *Pribory*, 2014, no. 9 (171), pp. 34–38.

Received: 25 March 2015.