

УДК 629.783

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ  
ОПЕРАТИВНОГО ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ  
ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАНДАРТОВ  
ЧАСТОТЫ И ВРЕМЕНИ, ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ  
БЕЗЗАПРОСНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ,  
ПО СИГНАЛАМ ОТКРЫТОГО ДОСТУПА ГЛОНАСС**

**А.Н. Жуков, С.М. Зотов, Н.С. Чурилов**

*Филиал «ПНБО» АО «НПК «СПП», Королев, Московская обл., Россия,  
zhukov@snav.ru,  
zotov@snav.ru,  
churilov-ns@yandex.ru*

*Аннотация. В настоящей статье приведено описание и результаты экспериментальной отработки технологии проведения оперативного дистанционного контроля точностных характеристик стандартов частоты и времени, входящих в состав беззапросных измерительных систем, по сигналам открытого доступа ГЛОНАСС.*

*Ключевые слова: стандарты частоты и времени, контроль характеристик, ГЛОНАСС.*

**THE TECHNOLOGY FOR ULTRA-RAPID MONITORING  
OF THE ACCURACY CHARACTERISTICS OF TIME  
AND FREQUENCY SOURCES INTEGRATED  
IN PSEUDORANGE MEASURING SYSTEMS  
USING GLONASS OPEN ACCESS SIGNALS ONLY**

**A.N. Zhukov, S.M. Zotov, N.S. Churilov**

*Branch "PNBO" JSC "NPK" SPP", Korolev, Moscow region, Russia,  
zhukov@snav.ru,  
zotov@snav.ru,  
churilov-ns@yandex.ru*

*Abstract. This article contains a description and testing results of the technology for ultra-rapid monitoring of the accuracy characteristics of time and frequency sources integrated in pseudorange measuring systems using GLONASS open access signals only.*

*Keywords: time and frequency sources, characteristics monitoring, GLONASS.*

**Введение**

В настоящее время актуальной является задача оперативного контроля точностных характеристик (ТХ) беззапросных измерительных систем (БИС), оснащенных высокоточными стандартами частоты и времени (СЧВ), в условиях наличия тенденций к расширению географии мест размещения указанных

систем, повышения требований к их ТХ и автономности функционирования. Одной из характеристик БИС, подлежащей контролю, является нестабильность частоты СЧВ, входящих в их состав. Наиболее распространённой мерой нестабильности частоты является среднее квадратическое двухвыборочное отклонение (СКДО), также называемое вариацией Аллана.

Классический подход к оцениванию ТХ СЧВ предполагает их демонтаж и транспортировку к высокоточному (эталонному) стандарту. В случае размещения контролируемой БИС в труднодоступном или удалённом районе, данная процедура может быть крайне дорогостоящей, либо не реализуемой в принципе. Данный подход также исключает возможность проведения контроля в оперативном режиме. Существует ряд альтернативных подходов, основанных на обработке измерений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), проводимых БИС. К основным из них можно отнести следующие.

1. Оценка нестабильности частоты оцениваемого СЧВ с использованием высокоточных решений часов БИС, формируемых различными центрами обработки ГНСС глобально в апостериорном режиме.
2. Оценка нестабильности частоты оцениваемого стандарта с использованием приращений разностей одномоментных фазовых измерений псевдодальности, сформированных по схеме «эталонная БИС — НКА — оцениваемая БИС».
3. Оценка нестабильности частоты оцениваемого СЧВ с использованием оценок расхождений шкалы времени (РШВ) БИС и системных шкал ГНСС, получаемых в результате решения навигационной задачи (РНЗ) с использованием передаваемых эфемерид и частотно-временных поправок (ЧВП). Основными недостатками первого подхода являются:
  - решения, как правило, недоступны в оперативном режиме;
  - решения проводятся по фиксированной сети измерителей, в которую могут быть не включены оцениваемые БИС;
  - решения, как правило, проводятся с использованием измерений нескольких ГНСС, в то время как оцениваемые БИС могут проводить измерения только по ГЛОНАСС.

Основным недостатком второго подхода является дополнительное увеличение случайной составляющей погрешности измерений, возникающее вследствие формирования их приращений во времени.

Основным недостатком третьего подхода является значительное влияние погрешностей передаваемых ЧВП навигационных космических аппаратов (НКА) на результаты контроля.

Для снижения влияния описанных недостатков была разработана технология, позволяющая осуществлять оперативный дистанционный контроль ТХ СЧВ из состава БИС, проводящих измерения только по ГЛОНАСС. Данная технология основана на формировании «многопутевых» разностей одномоментных кодовых и фазовых измерений псевдодальности, проведённых эталонной (использующей в качестве опорного эталонный СЧВ), оцениваемой и (при условии отсутствия перекрытия зон радиовидимости эталонной и оцениваемой БИС) ряда вспомогательных БИС.

### Описание разработанной технологии

Рассматриваемая технология включает в себя следующие основные этапы.

1. Обработка в апостериорном и оперативном режимах кодовых измерений псевдодальности и измерений на фазе несущей частоты БИС, участвующих в расчёте, с наиболее полным учётом факторов модели измерений.
2. Разделение собственных аппаратурных погрешностей измерений оцениваемой БИС и ТХ СЧВ с использованием следующих подходов:
  - оценивание погрешности кодовых измерений псевдодальности путём формирования одномоментных разностей с соответствующими фазовыми измерениями;
  - оценивание погрешности фазовых измерений псевдодальности путём формирования вторых разностей с одномоментными фазовыми измерениями других БИС;
  - предварительная оценка собственной ШВ БИС и остаточных погрешностей измерений, полученных в ходе РНЗ.
3. Коррекция кодовых измерений фазовыми, уточнение поправок на систематические составляющие погрешностей измерений для каждой пары «эталонная (оцениваемая, вспомогательная) БИС — НКА» в апостериорном режиме [1]. Оценивание остаточных погрешностей измерений БИС, полученных в ходе РНЗ с использованием высокоточных эфемерид и ЧВП.
4. Коррекция систематических составляющих погрешностей с использованием поправок, уточнённых на 3 этапе данной технологии.
5. Формирование «многопутевых» разностей одномоментных измерений по общей схеме «эталонная БИС —  $i$ -й НКА —  $k$ -я вспомогательная БИС —  $j$ -й НКА — ... — оцениваемая БИС» (рис. 1). При этом с целью снижения погрешности оценивания формируются все возможные разности с участием различного количества вспомогательных БИС.

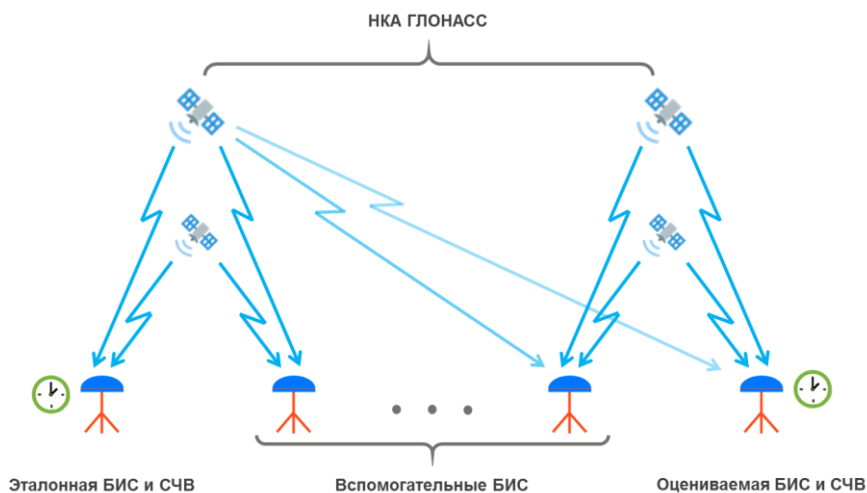


Рис. 1. Схема формирования «многопутевых» разностей измерений

6. Существенное снижение геометрической составляющей из полученных «многопутевых» разностей путём вычитания из измерений модельных значений (расчётных аналогов), вычисленных с использованием исходных геодезических данных эталонной, оцениваемой и вспомогательных БИС, а также эфемерид НКА.
7. Фильтрация аномальных данных в разностных измерениях (в которых отсутствует влияние ЧВП КА) и формирование «точечных» оценок РШВ, реализуемых эталонным и оцениваемым СЧВ, путём усреднения одномоментных «многопутевых» разностей с учётом весов, рассчитанных в зависимости от углов места наблюдения НКА и оценок остаточных погрешностей измерений БИС, полученных на 3 этапе данной технологии:

$$\bar{x}(t_i) = \frac{\sum_{k=1}^K x_k(t_i) \cdot w_k(t_i)}{\sum_{k=1}^K w_k(t_i)}, \quad (1)$$

где  $x_k(t_i)$  — оценка РШВ на эпоху  $t_i$ , полученная по  $k$ -й «многопутевой»

разности;  $w_k(t_i) = \frac{(\sigma_{\min}(t_i))^2}{(\sigma_k(t_i))^2}$  — вес  $k$ -й «многопутевой» разности;  $\sigma_k(t_i) =$

$= f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$  — оценка погрешности  $k$ -й «многопутевой» разности, зависящая от углов места наблюдения НКА  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  и оценок остаточных погрешностей измерений БИС  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ ;  $\sigma_{\min}(t_i)$  — минимальное из значений  $\sigma_k(t_i)$ .

8. Аппроксимация «точечных» оценок РШВ линейной регрессионной моделью на заданном интервале осреднения (час, сутки). Формирование выборки оценок частоты оцениваемого СЧВ как коэффициентов построенных регрессионных моделей:

$$\tilde{x}_j(t) = \tilde{w}_{j0} + \tilde{w}_{j1} \cdot t, \quad (2)$$

$$\tilde{y}_j = \tilde{w}_{j1}, \quad (3)$$

где  $\tilde{w}_{j0}$  и  $\tilde{w}_{j1}$  — уточняемые параметры регрессионной модели на  $j$ -м часовом (суточном) подинтервале.

9. Расчёт оценок нестабильности частоты оцениваемого СЧВ (вариации Аллана) на заданном интервале осреднения  $\tau$  (час, сутки):

$$\sigma_\tau^2 = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{j=1}^{M-1} (\tilde{y}_{j+1} - \tilde{y}_j)^2, \quad (4)$$

где  $M$  — количество интервалов осреднения  $\tau$ .

Основные преимущества, обеспечиваемые при применении разработанной технологии, следующие:

- разделение аппаратурных погрешностей измерений оцениваемой БИС и ТХ собственного СЧВ, минимизация влияния собственных существенных погрешностей навигационной аппаратуры на достоверность оценок ТХ СЧВ;
- минимизация влияния погрешностей ЧВП НКА и СЧВ «промежуточных» БИС, отсутствие требований к их нестабильности частоты;
- уменьшение влияния погрешностей эфемерид НКА при формировании разностных измерений (остаётся разность погрешностей эфемерид в проекции НКА на БИС одного «колена», используемого в рассматриваемой технологии);
- устойчивость к произвольным пропускам в данных, к аномальным измерениям, ошибкам эфемерид НКА ГЛОНАСС;
- отсутствие необходимости в глобальной сети измерителей;
- возможность получения удовлетворительных результатов только с использованием НКА ГЛОНАСС даже в условиях неполной орбитальной группировки, отсутствия или проведения некачественных измерений по значительному количеству НКА;
- возможность гибкой оптимизации топологии сети в зависимости от оценок ТХ измерительных средств (исключение БИС, работающих некачественно, включение в схему новых БИС с удовлетворительными ТХ);
- отсутствие требований к изменению штатного режима функционирования БИС (при проведении калибровочных работ);
- при наличии секундных измерений БИС можно достоверно оценивать нестабильность частоты СЧВ на более коротких интервалах (например, 100 секунд);
- потенциальная возможность сличения ШВ удалённых СЧВ.

### **Экспериментальная отработка созданной технологии**

Экспериментальная отработка созданной технологии проводилась на интервале с 01.06.2020 г. по 21.06.2020 г.

В ходе экспериментальной отработки был выполнен расчёт значений часовой и суточной нестабильностей частоты (в терминах вариации Аллана) для пары удалённых СЧВ, чьи точностные характеристики заведомо превышают теоретически достижимый уровень точности контроля с использованием разработанной технологии. Таким образом, полученные в ходе экспериментальной отработки значения нестабильности частоты следует рассматривать как оценки совокупной погрешности разработанной технологии (методической погрешности и инструментальной погрешности использованных измерительных средств).

В качестве эталонного СЧВ использовался Государственный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени (ГЭВЧ) РФ [2]. Контролю подвергалась нестабильность частоты резервного СЧВ Военно-морской обсерватории США (USNO Alternate Master Clock (USNO AMC)), штат Колорадо [3]. Расстояние между СЧВ составляет около 9000 км.

Оценивание проводилось по «многопутевой» схеме с использованием кодовых и фазовых измерений псевдодалности следующих приёмников:

- MYT2 (Менделеево, РФ) — ГЭВЧ;
- TLSE (Тулуза, Франция);
- VALD (Валь-д’Ор, Канада);
- AMC4 (Колорадо-Спрингс, США) — USNO AMC.

В оценивании использовались измерения, проведённые только по НКА системы ГЛОНАСС на сигналах открытого доступа. В основном варианте расчёта участвовал 21 НКА из состава штатной орбитальной группировки (ОГ) ГЛОНАСС (исключены НКА с некорректными данными и НКА, функционирующие в одночастотном режиме). С целью имитации влияния различных мешающих факторов (задержек поступления или потерь измерительной информации, некачественных эфемерид, аномальных измерений БИС и т.д.) при необходимости проведения оценивания в оперативном режиме был проведён расчёт с сокращённым составом ОГ до 14 НКА.

В ходе расчётов использовались два набора эфемерид НКА ГЛОНАСС:

- эфемериды, передаваемые НКА ГЛОНАСС в составе навигационного кадра (НК) на сигналах открытого доступа;
- высокоточные эфемериды, сформированные Системой высокоточного определения навигационной и эфемеридно-временной информации в реальном времени для гражданских потребителей (СВОЭВИ).

Условия и результаты расчётов, проведённых в рамках экспериментальной отработки, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Условия и результаты расчётов

Нестабильность частоты	Состав ОГ	Используемые эфемериды	Вариация Аллана
суточная	21 НКА	СВОЭВИ	$2,74 \cdot 10^{-15}$
часовая	21 НКА	СВОЭВИ	$4,78 \cdot 10^{-14}$
часовая	21 НКА	НК	$1,02 \cdot 10^{-13}$
часовая	14 НКА	НК	$3,61 \cdot 10^{-13}$

Дополнительно, с использованием разработанной технологии, было проведено оценивание часовой нестабильности частоты другой пары высокоточных удалённых СЧВ, по сигналам которых осуществляют временную привязку измерений следующие БИС:

- WTZR (Ветцель, Германия) — эталонный СЧВ;
- ONSA (Онсала, Швеция) — оцениваемый СЧВ.

Особенностью данной пары БИС является их относительно близкое расположение (расстояние ~900 км), что обуславливает значительное перекрытие зон радиовидимости и снимает необходимость использования вспомогательных БИС при расчёте оценок нестабильности частоты.

В результате расчёта для пары БИС WTZR и ONSA по 21 НКА ГЛОНАСС с использованием эфемерид СВОЭВИ оценка часовой нестабильности частоты оцениваемого СЧВ составила  $9,35 \cdot 10^{-15}$ . В силу того, что действительные точностные характеристики данных СЧВ заведомо превышают теоретически достижимый уровень точности контроля с использованием разработанной технологии, полученное значение нестабильности частоты следует рассматривать как оценку совокупной погрешности разработанной технологии (методической погрешности и инструментальной погрешности использованных измерительных средств).

### Заключение

В настоящей статье рассмотрены основные существующие подходы к решению актуальной задачи оперативного контроля ТХ БИС, оснащённых высокоточными СЧВ, расположенных в труднодоступных районах и проводящих измерения по сигналам открытого доступа НКА ГЛОНАСС. Приведены недостатки описанных подходов, обуславливающие необходимость разработки новой технологии.

Представлено описание разработанной технологии, основанной на формировании «многопутевых» разностей одномоментных кодовых и фазовых измерений псевдодальности, проведённых эталонной (использующей в качестве опорного эталонный СЧВ), оцениваемой и (при условии отсутствия перекрытия зон радиовидимости эталонной и оцениваемой БИС) ряда вспомогательных БИС.

Представлены результаты экспериментальной отработки рассмотренной технологии, подтверждающие возможность её применения для дистанционного оперативного контроля характеристик следующих основных типов высокоточных СЧВ:

- суточная нестабильность частоты пассивных водородных стандартов (погрешность оценивается на уровне  $2,74 \cdot 10^{-15}$  при использовании эфемерид НКА ГЛОНАСС, рассчитанных в СВОЭВИ);
- верхняя оценка часовой нестабильности частоты пассивных водородных стандартов, находящихся на значительном удалении друг от друга и не имеющих общих зон радиовидимости (с погрешностью на уровне  $4,78 \cdot 10^{-14}$  при использовании оперативных эфемерид НКА ГЛОНАСС, рассчитанных в СВОЭВИ);
- в перспективе (при снижении аппаратных погрешностей БИС, погрешностей эфемерид НКА и учёта факторов модели измерения) — достоверная оценка часовой нестабильности частоты пассивных водородных стандартов (на текущий момент достигаемый уровень погрешности составляет  $9,35 \cdot 10^{-15}$  для СЧВ из состава БИС, имеющих общие зоны радиовидимости);

- часовая нестабильность частоты лучших рубидиевых стандартов (погрешность оценивается на уровне  $1,02 \cdot 10^{-13}$  при использовании эфемерид НКА ГЛОНАСС, передаваемых в составе навигационного сообщения на сигналах открытого доступа);
- часовая нестабильность частоты рубидиевых стандартов в условиях неполной ОГ ГЛОНАСС (до 14 НКА), имитирующей влияние различных мешающих факторов: задержек поступления или потери части измерительной информации, некачественных эфемерид, аномальных измерений БИС и т.д. (погрешность оценивается на уровне  $3,61 \cdot 10^{-13}$  при использовании эфемерид НКА ГЛОНАСС, передаваемых в составе навигационного сообщения на сигналах открытого доступа).

### Список литературы

1. Зотов С.М., Чурилов Н.С. Технология формирования данных для оперативного контроля погрешности определения потребителем пространственных координат за счет ошибок космического сегмента ГЛОНАСС // Двойные технологии. — 2020. — № 4 (93). — С. 47–51.
2. ГЭТ 1-2018. Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени // ВНИИФТРИ: [сайт]. — URL: <https://vniiftri.ru/standards/izmereniya-vremeni-i-chastoty/get-1-2018-gosudarstvennyy-pervichnyy-etalon-edinits-vremeni-chastoty-i-natsionalnoy-shkaly-vremeni> (дата обращения: 09.2021).
3. USNO Alternate Master Clock. — URL: <https://www.usno.navy.mil/USNO/time/master-clock/u.s.-naval-observatory-alternate-master-clock> (дата обращения: 09.2021).

*Статья поступила в редакцию: 24.01.2022 г.*

*Статья прошла рецензирование: 28.01.2022 г.*

*Статья принята в работу: 01.02.2022 г.*