

УДК 521.92

**ПРИМЕНЕНИЕ КАЛИБРОВАННОГО  
НАВИГАЦИОННОГО ПРИЁМНИКА ДЛЯ ОЦЕНКИ  
ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЗА СЧЁТ  
КОСМИЧЕСКОГО СЕГМЕНТА (SISRE) ГЛОНАСС**

**В.В. Митрикас<sup>1</sup>, И.О. Скакун<sup>1</sup>, А.А. Аржанников<sup>1</sup>, В.Н. Федотов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш», Королёв, Московская обл., Россия,

<sup>2</sup>ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,  
fedotov@vniiftri.ru

*Аннотация.* В статье приведена оценка влияния межсигнальных и межчастотных смещений навигационных сигналов ГЛОНАСС на расчёт погрешности измерения за счёт космического сегмента (SISRE) по результатам обработки измерений калиброванного навигационного приёмника. Расчёт SISRE ГЛОНАСС выполнен в зависимости от используемых потребителем измерений, а также с учётом условий, в которых предположительно этот показатель рассчитывается зарубежными центрами IGS.

*Ключевые слова:* ГЛОНАСС, калибровка, погрешность, SISRE, эфемеридно-временная информация, интерфейсный контрольный документ.

**APPLICATION OF A CALIBRATED NAVIGATION  
RECEIVER FOR ESTIMATING MEASUREMENT  
ERROR VIA GLONASS SPACE SEGMENT (SISRE)**

**V.V. Mitrikas<sup>1</sup>, I.O. Skakun<sup>1</sup>, A.A. Arzhannikov<sup>1</sup>, V.N. Fedotov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>IAC PNT FGUP «TSNIIMASH», Korolev, Moscow region, Russia,

<sup>2</sup>FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow region, Russia,  
fedotov@vniiftri.ru

*Annotation.* The article provides an assessment of the influence of intersignal and interfrequency biases of GLONASS navigation signals on the calculation of the measurement error due to the space segment (SISRE) based on the results of processing measurements of a calibrated navigational receiver. The GLONASS SISRE calculation is made depending on the measurements used by the consumer, as well as taking into account the conditions in which this indicator is supposedly calculated by foreign IGS centers.

*Key words:* GLONASS, calibration, error, SISRE, ephemeris-time information, interface control document.

### Введение

Погрешность определения координат потребителя по измерениям глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) обычно оценивается как произведение эквивалентной погрешности измерения дальности (ЭПД) и геометрического фактора (DOP — Dilution Of Precision). ЭПД потребителя складывается из трёх основных составляющих:

- погрешности за счёт космического сегмента (эфмеридно-временная информация (ЭВИ), разрядность, межсигнальные, межлитерные и межчастотные временные задержки при излучении навигационных сигналов);
- погрешности за счёт учёта распространения навигационного сигнала в среде (ионосфера и тропосфера);
- погрешности за счёт навигационной аппаратуры потребителя (НАП) (шум, многолучёвость, межсигнальные, межлитерные и межчастотные временные задержки при приёме навигационных сигналов).

Несмотря на то, что погрешность за счёт космического сегмента (SISRE — Signal-In-Space Range Error) включает несколько составляющих, в большинстве случаев рассматривается только погрешность за счёт ЭВИ. Общим подходом является сравнение ЭВИ из навигационных сообщений сигналов с апостериорной ЭВИ, рассчитанной независимо, то есть без использования измерительных средств и программного обеспечения наземных сегментов ГНСС. В большинстве случаев апостериорная ЭВИ рассчитывается центрами анализа ГНСС, так или иначе сотрудничающими с Международной службой ГНСС (IGS — International GNSS Service). В качестве исходных данных используются измерения глобально расположенных станций: беззапросных измерительных (БИС) и квантово-оптических (КОС). БИС в большинстве случаев по точностным характеристикам как минимум не уступают характеристикам средств наземных сегментов ГНСС, поскольку оснащаются наиболее современными образцами коммерческой НАП. Топология сети станций IGS значительно превосходит наземные сегменты ГНСС, в особенности для ГЛОНАСС и BeiDou, где 100 % покрытия орбит измерениями отсутствуют. Поэтому качество и объём исходной информации для расчёта штатной и апостериорной ЭВИ несоизмеримы.

Другим, не менее серьёзным отличительным фактором является применение в центрах анализа ГНСС наиболее совершенных моделей и методов обработки. Таким образом, апостериорная ЭВИ центров анализа ГНСС по точности превосходит данные наземных сегментов, следовательно, может использоваться для их оценки. Однако непосредственное сравнение затруднительно, в частности, из-за разной привязки ЭВИ: в случае наземных сегментов ГНСС (навигационные сообщения) — к номинальным, а не фактическим фазовым центрам навигационных антенн, для упрощения алгоритмов потребителя, а в случае апостериорной ЭВИ — к центрам масс космических аппаратов (КА) при расчёте орбит и к уточнённым фактическим фазовым центрам навигационных антенн при расчёте бортовых часов. Для перехода необходимо знание номинальных положений фазовых центров навигационных антенн, используемых в наземных сегментах ГНСС, что в настоящее время доступно, например, для GALILEO. На практике методом наименьших квадратов на длительном интервале времени по ЭВИ из навигационных сообщений

можно с точностью до нескольких сантиметров уточнить положение фазовых центров навигационных антенн, к которым отнесены эфемериды КА. Пока речь идёт о кодовых измерениях и дециметровых оценках SISRE, это возможно даже по разностям апостериорной и штатной ЭВИ. При этом для корректной оценки SISRE наиболее принципиально знание хорошо наблюдаемой радиальной составляющей. Именно так, в частности, в этой работе, были определены смещения для КА ГЛОНАСС, GPS, BeiDou. Наблюдаемое отличие между разными КА ГНСС до нескольких сантиметров не имеет значения, учитывая величины погрешности штатной ЭВИ, и для оценки SISRE также не имеет значения.

При создании КА предполагалось отсутствие систематических смещений между навигационными сигналами на одной частоте, а значения межчастотных временных задержек предполагалось получать на этапе наземной отработки. На практике оказалось, что существуют устойчивые межсигнальные и межчастотные временные задержки, характерные не только для бортовой аппаратуры, но и для НАП. Определение этих задержек стало возможным с появлением глобальных сетей измерительных станций на основе большого числа коммерческой НАП геодезического класса. В общем случае определение абсолютных значений задержек в каждом диапазоне невозможно, но возможно определение суммарных дифференциальных значений для пары БИС – КА. Разделение на «верх» (КА) и «низ» (БИС) возможно либо с наложением дополнительных ограничений (как правило, равенства нулю суммы по всем КА), либо по измерениям калиброванного навигационного приёмника. В частности, именно так в Лаборатории реактивного движения (JPL — Jet Propulsion Laboratory) определяются межчастотные смещения сигналов GPS, передаваемые в навигационных сообщениях, которые отличаются на величину около 4 нс от значений, получаемых центрами анализа IGS по сети станций с наложением дополнительных ограничений.

Для ГЛОНАСС ситуация отличается наличием межлитерных зависимостей в НАП на уровне нескольких десятков сантиметров, которые оказались индивидуальными не только для разных производителей НАП, но и для образцов НАП одного производителя, а как выяснилось позже, — и для разных версий программного обеспечения (ПО) НАП. Поэтому понятие среднего по сети станций навигационного приёмника ГЛОНАСС существенно отличается от аналогичного приёмника GPS. Долгое время задача не решалась из-за имеющихся инструментальных погрешностей измерений имитаторов навигационных сигналов (НС), используемых для калибровки НАП. Однако в последние годы появились имитаторы НС, практически не имеющие данных погрешностей, или их значения пренебрежимо малы. Произошло существенное сближение характеристик НАП разных производителей. Здесь важно отметить, что НС, излучаемые КА, отличаются от идеальных, формируемых имитаторами. Это вызвано отличиями в бортовой аппаратуре разных КА, производимой из разных комплектующих, работой аппаратуры в течение

длительного периода времени либо отказами каких-то её комплектов. Для GPS это осложняется наличием в составе орбитальной группировки КА нескольких типов (II-R, IIR-M, II-F, III-A), для ГЛОНАСС — использованием разных типов усилителей в бортовой аппаратуре, а для BeiDou ещё и разными типами орбит. В результате даже калиброванная НАП разных производителей имеет разные систематические погрешности измерений из-за отличия НС от идеальных. В этом смысле наиболее изоморфными являются КА GALILEO, что при прочих равных условиях предполагает более высокую потенциальную точность этой системы на уровне потребителя.

В соответствии с интерфейсным контрольным документом (ИКД) [1] бортовая ЭВИ привязана к измерениям С1Р (здесь и далее будут использоваться обозначения измерений, принятые в описании формата обмена данными спутниковых навигационных приёмников) [5], то есть для двухчастотного потребителя требуется учёт передаваемого в составе навигационных сообщений взаимного смещения  $\Delta\tau_n$  между навигационными сигналами на разных частотах, в отличие от GPS, где аналогичное смещение  $T_{GD}$  предназначено для одночастотных потребителей. Несмотря на отсутствие в ИКД [1] в явном виде информации о необходимости использования смещения  $\Delta\tau_n$  для двухчастотного потребителя и соответствующих формул, это требует уточнения в последующих редакциях.

### Теоретические основы определения SISRE

Обычно для орбитальной группировки КА на круговых орбитах SISRE определяется формулой:

$$\text{SISRE}^2 = (\Delta R - \Delta C)^2 + K^2(\Delta N^2 + \Delta B^2), \quad (1)$$

где  $\Delta R$ ,  $\Delta N$ ,  $\Delta B$  — отклонения орбиты КА в проекциях на оси орбитальной системы координат;  $\Delta C$  — отклонения поправок бортовых часов с исключением разности шкал времени;  $K$  — коэффициент, зависящий от высоты орбиты (для ГЛОНАСС  $K = 0,18$ ).

Отсюда следует, что наибольшее влияние имеют отклонения орбит в радиальном направлении и отклонения поправок бортовых часов от прогнозных значений. Как указано выше, для корректного учёта в SISRE погрешности за счёт ЭВИ требуется сведение бортовых и апостериорных данных к общей точке, что без наличия информации об используемых в наземных сегментах ГНСС положениях фазовых центров навигационных антенн возможно с точностью на уровне 10 см. Однако наибольшее значение в данном случае имеют отклонения поправок бортовых часов, которые в первую очередь зависят от погрешностей за счёт уточнения и прогноза частотно-временных параметров (ЧВП). Погрешности за счёт уточнения ЧВП в свою очередь зависят от систематических погрешностей при проведении измерений.

Для уточнения ЭВИ, как правило, используются измерения сети БИС. В общем случае измерение псевдодальности может быть представлено в следующем виде:

$$P_{GS,P1}^{SC} = \overline{P_{GS}^{SC}} + I_{GS,1}^{SC} + b_{GS(SC),P1} + b_{P1}^{SC} + \varepsilon_{GS,P1}^{SC}, \quad (2)$$

где  $P_{GS,P1}^{SC}$  — измеренное значение псевдодальности для заданной пары БИС – КА ( $GS - SC$ ), здесь  $P1$  — измерение огибающей навигационного сигнала на частоте  $L1$  ( $C1P$  в обозначениях [5]) обычно называемое кодовым измерением;

$$\overline{P_{GS}^{SC}} = \overline{\rho_{GS}^{SC}} + T_{GS}^{SC} + c \cdot (dt_{GS} - dt^{SC}), \quad (3)$$

$\overline{P_{GS}^{SC}}$  — истинное значение псевдодальности, включающее геометрическую дальность, погрешность за счёт влияния тропосферы, разность показаний бортовых часов КА и часов БИС;  $I_{GS,1}^{SC}$  — ионосферная задержка распространения сигнала между КА и БИС на частоте  $L1$ ;  $B_{P1} = b_{GS(SC),P1} + b_{P1}^{SC}$  — систематическая задержка сигнала для кодовых измерений псевдодальности  $C1P$ ;  $b_{GS(SC),P1}$  — систематическая задержка сигнала в БИС для кодовых измерений псевдодальности  $C1P$ , которая в общем случае зависит и от КА;  $b_{P1}^{SC}$  — систематическая задержка сигнала в бортовой аппаратуре КА для кодовых измерений псевдодальности  $P1$ ;  $\varepsilon_{GS,P1}^{SC}$  — погрешность кодовых измерений псевдодальности  $C1P$  по сигналам КА ( $SC$ ) в БИС ( $GS$ ).

Аналогичным образом могут быть записаны формулы и для других сигналов на других частотах  $C1C$ ,  $C2P$ ,  $C2C$  и т.д.

Из измерений на исходных частотах могут быть сформированы безионосферные комбинации  $P_{GS}^{SC,IF}$  ( $IF$  — iono-free combinations) измерений, которые, как правило, и используются для уточнения ЭВИ в виде:

$$P_{GS}^{SC,IF} = \frac{(f_1^{SC})^2 P_{GS,P1}^{SC} - (f_2^{SC})^2 P_{GS,P2}^{SC}}{(f_1^{SC})^2 - (f_2^{SC})^2} = \frac{(\lambda_2^{SC})^2 P_{GS,P1}^{SC} - (\lambda_1^{SC})^2 P_{GS,P2}^{SC}}{(\lambda_2^{SC})^2 - (\lambda_1^{SC})^2} =$$

$$= k1 \cdot P_{GS,P1}^{SC} - k2 \cdot P_{GS,P2}^{SC}; \lambda_i^{SC} = \frac{c}{f_i^{SC}}; k1 = \frac{(\lambda_2^{SC})^2}{(\lambda_2^{SC})^2 - (\lambda_1^{SC})^2}; k2 = \frac{(\lambda_1^{SC})^2}{(\lambda_2^{SC})^2 - (\lambda_1^{SC})^2}, \quad (4)$$

где  $f_1^{SC}, f_2^{SC}$  — несущие частоты навигационного сигнала КА в диапазонах  $L1$  и  $L2$  с учётом литерной зависимости для КА ГЛОНАСС;  $\lambda_1^{SC}, \lambda_2^{SC}$  — длины волн несущих частот навигационного сигнала КА в диапазонах  $L1$  и  $L2$  с учётом литерной зависимости для КА ГЛОНАСС.

Для соотношения частот ГЛОНАСС  $k_1 = 2,53125$ ,  $k_2 = 1,53125$ .

В литературе принято называть разности систематических задержек сигналов на одной частоте C1C–C1P, C2C–C2P — межсигнальными дифференциальными кодовыми смещениями (*DCB*), а разности на двух частотах C1P–C2P, C1C–C2C — межчастотными дифференциальными кодовыми смещениями (*DCB*). Они включают систематические задержки сигналов в бортовой аппаратуре КА и БИС. Соответственно

$$\begin{aligned} DCB_{P_1,P_2} &= B_{P_1} - B_{P_2} = (b_{GS(SC),P_1} + b_{P_1}^{SC}) - (b_{GS(SC),P_2} + b_{P_2}^{SC}) = \\ &= (b_{GS(SC),P_1} - b_{GS(SC),P_2}) + (b_{P_1}^{SC} - b_{P_2}^{SC}) = DCB_{GS(SC),P_1,P_2} + DCB_{P_1,P_2}^{SC}; \\ DCB_{C_1,P_1} &= B_{C_1} - B_{P_1} = (b_{GS(SC),C_1} + b_{C_1}^{SC}) - (b_{GS(SC),P_1} + b_{P_1}^{SC}) = \\ &= (b_{GS(SC),C_1} - b_{GS(SC),P_1}) + (b_{C_1}^{SC} - b_{P_1}^{SC}) = DCB_{GS(SC),C_1,P_1} + DCB_{C_1,P_1}^{SC}. \end{aligned} \quad (5)$$

С учётом того, что  $\overline{P_{GS}^{SC}} = P_{GS,P_1}^{SC} - (I_{GS,1}^{SC} + B_{P_1} + \varepsilon_{GS,P_1}^{SC})$ , следует безионосферная комбинация:

$$\begin{aligned} P_{GS}^{SC,IF} &= k_1 \cdot P_{GS,P_1}^{SC} - k_2 \cdot P_{GS,P_2}^{SC} = \\ &= (k_1 - k_2) \cdot \overline{P_{GS}^{SC}} + k_1 \cdot B_{P_1} - k_2 \cdot B_{P_2} + \delta I + k_1 \cdot \varepsilon_{GS,P_1}^{SC} - k_2 \cdot \varepsilon_{GS,P_2}^{SC} = \\ &= \overline{P_{GS}^{SC}} + k_1 \cdot B_{P_1} - k_2 \cdot (B_{P_1} - DCB_{P_1,P_2}) + \delta I + k_1 \cdot \varepsilon_{GS,P_1}^{SC} - k_2 \cdot \varepsilon_{GS,P_2}^{SC} = \\ &= \overline{P_{GS}^{SC}} + B_{P_1} + k_2 \cdot DCB_{P_1,P_2} + \delta I + k_1 \cdot \varepsilon_{GS,P_1}^{SC} - k_2 \cdot \varepsilon_{GS,P_2}^{SC} = \\ &= \overline{P_{GS}^{SC}} + B_{P_2} + k_1 \cdot DCB_{P_1,P_2} + \delta I + k_1 \cdot \varepsilon_{GS,P_1}^{SC} - k_2 \cdot \varepsilon_{GS,P_2}^{SC}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\delta I$  — остаточная погрешность при учёте ионосферной задержки распространения сигнала двухчастотным методом, составляющая менее 0,1 % [4]. Учитывая её малость, с точностью до шумовых погрешностей измерений можно записать:

$$\begin{aligned} P_{GS}^{SC,IF} &= \overline{P_{GS}^{SC}} + B_{P_1} + k_2 \cdot DCB_{P_1,P_2}; \\ P_{GS}^{SC,IF} &= \overline{P_{GS}^{SC}} + B_{P_2} + k_1 \cdot DCB_{P_1,P_2}. \end{aligned} \quad (7)$$

В терминах [3] систематические погрешности измерений безионосферной комбинации обозначаются как *IFB*, дифференциальные кодовые смещения — *DCB*. Соответственно

$$\begin{aligned} IFB_{P_1,P_2} &= k_1 \cdot (b_{GS(SC),P_1} + b_{P_1}^{SC}) - k_2 \cdot (b_{GS(SC),P_2} + b_{P_2}^{SC}) = \\ &= (k_1 \cdot b_{GS(SC),P_1} - k_2 \cdot (b_{GS(SC),P_2}) + (k_1 \cdot b_{P_1}^{SC} - k_2 \cdot b_{P_2}^{SC})) = \\ &= IFB_{GS(SC),P_1,P_2} + IFB_{P_1,P_2}^{SC}. \end{aligned} \quad (8)$$

В общем случае задержки  $IFB_{P1,P2}$  индивидуальны для каждой пары БИС – КА и типов измерений в безионосферной комбинации. Настоящая работа не ставит целью описание методики определения  $DCB$  и  $IFB$ , которые уточняются в центрах анализа IGS, в том числе ИАЦ КВНО (IAC PNT — Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing) АО «ЦНИИмаш». Однако необходимо отметить, что погрешность их определения в условиях обработки разнотипных БИС зависит от обрабатываемой сети станций и снижается, хотя и незначительно, по мере увеличения их числа в первую очередь из-за повышения стабильности задержек сигналов усреднённого по сети станций навигационного приёмника.

Знание  $DCB$  и  $IFB$  позволяет легко перейти к погрешностям измерений на исходных частотах:

$$\begin{aligned} B_{P1} &= \frac{IFB_{P1,P2} - k2 \cdot DCB_{P1,P2}}{k1 - k2} = IFB_{P1,P2} - k2 \cdot DCB_{P1,P2}; \\ B_{P2} &= \frac{IFB_{P1,P2} - k1 \cdot DCB_{P1,P2}}{k1 - k2} = IFB_{P1,P2} - k1 \cdot DCB_{P1,P2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Как правило, значения  $DCB$  и  $IFB$  получаются с наложением дополнительных ограничений на сумму значений по всем КА или БИС в обработке. При этом разложение  $DCB$  и  $IFB$  на составляющие для КА и БИС возможно для НС с кодовым разделением, когда смещения  $b_{GS(SC),P1} = b_{GS,P1}$  одинаковы для всех КА, что для ГЛОНАСС неприменимо из-за наличия сигналов с частотным разделением и возникающей литерной зависимостью.

При ежесуточном определении смещений  $DCB$  и  $IFB$  появляются их систематические составляющие погрешности из-за остаточной монолучёвости. Этот эффект может быть устранён при усреднении на периоде повторяемости трассы. Интересно, что для GPS трасса КА не является изомаршрутной, поскольку при проектировании закладывалась ежесуточная повторяемость зон видимости. Поэтому в GPS многолучёвость приводит к индивидуальным для каждого КА систематическим составляющим погрешностей определения  $DCB$  и  $IFB$ , значения которых в некоторых случаях превосходят шумовые погрешности кодовых измерений.

Появление калиброванного навигационного приёмника, для которого известны межсигнальные  $DCB_{GS(SC),C1,P1}$ ,  $DCB_{GS(SC),C2,P2}$  и межчастотные  $DCB_{GS(SC),P1,P2}$ ,  $DCB_{GS(SC),C1,C2}$  задержки сигналов, позволяет корректно рассчитать и соответствующие бортовые задержки сигналов. Кроме того, для такого приёмника должно быть получено номинально нулевое значение  $IFB_{P1,P2}^{DE}$ . Знание требуемых систематических погрешностей измерений

безионосферной комбинации, с которыми рассчитана какая-либо ЭВИ,  $IFB_{P1,P2}^{SO}$ , и реально учтённых при расчёте, исходя из (3), позволяет пересчитать поправки часов:

$$dt^{DE,SC} = dt^{SO,SC} + (IFB_{P1,P2}^{DE} - IFB_{P1,P2}^{SO}),$$

где  $dt^{SO,SC}$  — исходные поправки бортовых часов КА, соответствующие учтённым значениям  $IFB_{GS(SC),P1,P2}^{SO}$ ;  $dt^{DE,SC}$  — поправки бортовых часов КА, соответствующие требуемым значениям  $IFB_{P1,P2}^{DE}$ . При нулевых значениях  $IFB_{P1,P2}^{DE}$  поправки бортовых часов КА будут в точности соответствовать безионосферной комбинации измерений по его сигналам.

Аналогичным образом поправки бортовых часов КА могут быть пересчитаны к безионосферной комбинации любых типов измерений калиброванного навигационного приёмника, если для неё известны учтённые и требуемые систематические погрешности измерений. Исходный тип измерений не имеет значения, если при расчёте поправок бортовых часов КА вместе с кодовыми измерениями использовались и фазовые измерения, что значительно снижает их шумовые погрешности. При использовании только кодовых измерений преимущество должна иметь безионосферная комбинация C1P2C2P с наименьшими шумовыми погрешностями.

Важно, что наличие всех типов измерений калиброванного навигационного приёмника позволяет легко пересчитывать поправки бортовых часов КА от безионосферных комбинаций к одночастотными измерениями, для корректного использования которых потребитель должен учитывать ионосферную погрешность  $I_{GS}^{SC}$  на соответствующей частоте.

Выражая  $\overline{P_{GS}^{SC}}$  из (2) и (6) и приравнивая между собой, получаем:

$$P_{GS,P1}^{SC} - (I_{GS,1}^{SC} + B_{P1} + \varepsilon_{GS,P1}^{SC}) = P_{GS}^{SC,IF} - (B_{P1} + k2 \cdot DCB_{P1,P2} + \delta I + k1 \cdot \varepsilon_{GS,P1}^{SC} - k2 \cdot \varepsilon_{GS,P2}^{SC}).$$

Отсюда с точностью до шумовых погрешностей измерений и остаточной погрешности при учёте ионосферной задержки распространения сигнала двухчастотным методом можно записать:

$$P_{GS,P1}^{SC} - I_{GS,1}^{SC} = P_{GS}^{SC,IF} - k2 \cdot DCB_{P1,P2}.$$

В левой части выражения представлены измерения псевдодальности на частоте L1 с исключённой ионосферной задержкой распространения сигнала, которым соответствуют поправки бортовых часов КА  $dt_{P1}^{SC}$ , передаваемые в навигационных сообщениях. Учитывая (3), получаем:

$$dt_{IF}^{SC} = dt_{P1}^{SC} - k2 \cdot \frac{DCB_{P1,P2}}{c}. \quad (10)$$



Положительная задержка сигнала L2 относительно L1 приводит к тому, что  $P_{GS,P2}^{SC} > P_{GS,P1}^{SC}$ , то есть передаваемая в навигационных сообщениях поправка  $\Delta\tau_n$  с учётом (5) может быть выражена:

$$\Delta\tau_n = B_{P2} - B_{P1} = -\frac{DCB_{P1,P2}^{SC}}{c}. \quad (11)$$

Можно получить отсутствующую в [1] формулу перехода, которая должна использоваться двухчастотными потребителями ГЛОНАСС для коррекции передаваемых в навигационных сообщениях ЧВП:

$$dt_{IF}^{SC} = dt_{P1}^{SC} + 1,53125 \cdot \Delta\tau_n.$$

С учётом ненулевых значений  $DCB_{C1,P1}^{SC}$  и  $DCB_{C2,P2}^{SC}$  возникает вопрос о типах измерений, которым соответствуют передаваемые в навигационных сообщениях значения поправок бортовых часов и межчастотных смещений, что требует уточнения в последующих редакциях [1].

Как указано выше, для уточнения ЭВИ используются безионосферные комбинации измерений. В предположении, что это C1P2P, с помощью (10) можно записать все переходы между поправками бортовых часов КА в зависимости от используемых типов измерений C2P, C1C, C2C, C1CC2C, C1CC2P:

$$\begin{aligned} dt_{C1P}^{SC} &= dt_{C1P2P}^{SC} + k2 \cdot \frac{DCB_{C1P2P}^{SC}}{c}; \\ dt_{C2P}^{SC} &= dt_{C1P2P}^{SC} + k1 \cdot \frac{DCB_{C1P2P}^{SC}}{c} = dt_{C1P}^{SC} + \frac{DCB_{C1P2P}^{SC}}{c}; \\ dt_{C1C}^{SC} &= dt_{C1P}^{SC} - \frac{DCB_{C1CC1P}^{SC}}{c} = dt_{C1CC2C}^{SC} + \\ &+ k2 \cdot \frac{DCB_{C1CC2C}^{SC}}{c} = dt_{C1CC2P}^{SC} + k2 \cdot \frac{DCB_{C1CC2P}^{SC}}{c}; \\ dt_{C2C}^{SC} &= dt_{C1C}^{SC} + \frac{DCB_{C1CC2C}^{SC}}{c}. \end{aligned} \quad (12)$$

При доступности всех четырёх типов измерений калиброванного навигационного приёмника появляется возможность использования разных дифференциальных кодовых смещений (5) и систематических погрешностей измерений (8), контролируя остаточные отклонения переходов между различными измерениями и их комбинациями.

Анализ результатов обработки за многолетний период показывает, что систематические погрешности измерений современной НАП являются достаточно стабильными во времени. Учитывая это, измерения калиброванного навигационного приёмника для калибровки БИС не требуются постоянно. В то же время постоянное поступление данных калиброванного приёмника

необходимо для упрощения определения дифференциальных кодовых смещений и систематических погрешностей измерений безионосферной комбинации. Целесообразно иметь 2–3 таких приёмника, разнесённых в пространстве, чтобы минимизировать остаточную многолучёвость и возможное влияние неблагоприятной помеховой обстановки.

### **Проблемные вопросы при оценке SISRE**

В отсутствие информации о привязке ЭВИ из навигационных сообщений ГЛОНАСС, а строго говоря, и информации о типах измерений, по которым рассчитывается штатная ЭВИ, оценка SISRE возможна относительно некоторого математического эталонного средства, систематические погрешности измерений которого совпадают с систематическими отклонениями ЭВИ из навигационных сообщений на предшествующем 24-суточном интервале (3 периода повторяемости трассы КА для повышения достоверности оценки). Это возможно, учитывая достаточную стабильность во времени систематических погрешностей изменений бортовой аппаратуры КА и БИС. Иными словами, усреднённый по обрабатываемой сети станций математический приёмник имеет очень стабильные характеристики, что проявляется в стабильности систематических погрешностей измерений большинства БИС. Очевидным недостатком такого подхода является его отличие от действительности, поскольку изменение систематических отклонений штатной ЭВИ полностью компенсируется только через 24 суток новыми систематическими погрешностями измерений такого «ведомого» эталонного средства. По сути рассчитываемые таким образом оценки SISRE ГЛОНАСС соответствуют нулевым систематическим отклонениям межчастотных смещений, передаваемых в навигационных сообщениях, нулевым систематическим погрешностям измерений средств наземного сегмента, измерения которых используются для расчёта штатной ЭВИ, и отсутствию погрешности за счёт обработки. Такие оценки не могут использоваться в условиях создания международной системы мониторинга характеристик ГНСС (IGMA — International GNSS Monitoring and Assessment) из-за фактического отсутствия реально существующего средства, которому соответствует апостериорная ЭВИ.

Доступность измерений калиброванного навигационного приёмника ФГУП «ВНИИФТРИ» (условное наименование SU04, рег. № 63663-16 в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений) предоставило возможность применения принципиально иного подхода к оценке SISRE, выбрав данное средство в качестве эталонного. Однако для этого требуется как минимум стабильность его систематических погрешностей измерений (*IFB* в терминах [3]). С этой целью по результатам обработки измерений приёмника SU04 были определены систематические погрешности перекрёстных безионосферных комбинаций измерений (C1PC2P, C1CC2P, C1PC2C,

C1CC2C) относительно среднего по сети станций математического приёмника. График их изменений для безионосферной комбинации C1PC2P приведён на рис. 1, а для комбинации C1CC2C — на рис. 2. Для снижения остаточных погрешностей за счёт многолучёвости ежедневные значения погрешностей усреднены на предшествующем 24-суточном интервале.

По результатам обработки измерений приёмника SU04 были также определены межчастотные и межсигнальные дифференциальные кодовые смещения (*DCB*). Эти оценки усреднены на недельном интервале для снижения случайной составляющей погрешности. Графики изменений межсигнальных *DCB* в диапазоне L1 приведены на рис. 3, а межчастотных *DCB* — на рис. 4–5. На рис. 3–5 заметны скачкообразные изменения оцениваемых значений *DCB* для КА «Глонасс-760» в рабочей точке 24, связанные с его введением в систему и использованием по целевому назначению с 14.04.2020.

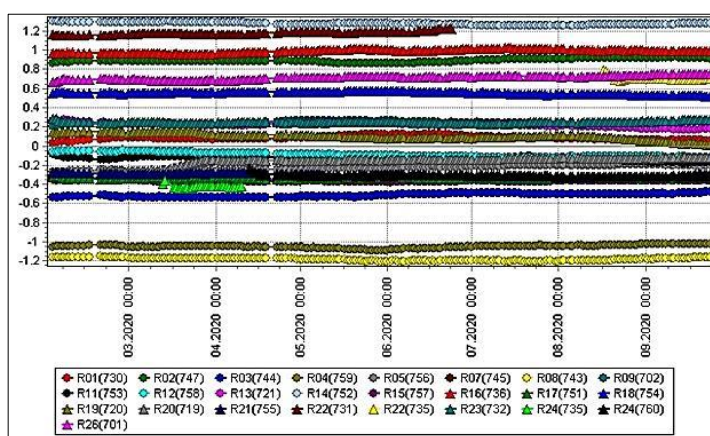


Рис. 1. Изменение систематических погрешностей измерений приёмника SU04 (безионосферная комбинация C1PC2P) (в метрах)

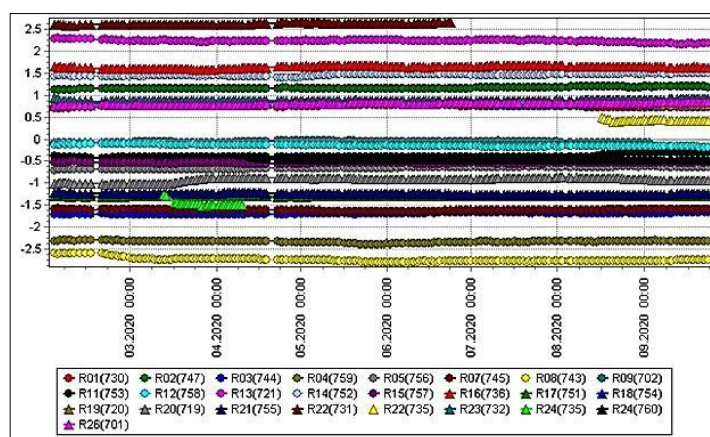


Рис. 2. Изменение систематических погрешностей измерений приёмника SU04 (безионосферная комбинация C1CC2C) (в метрах)

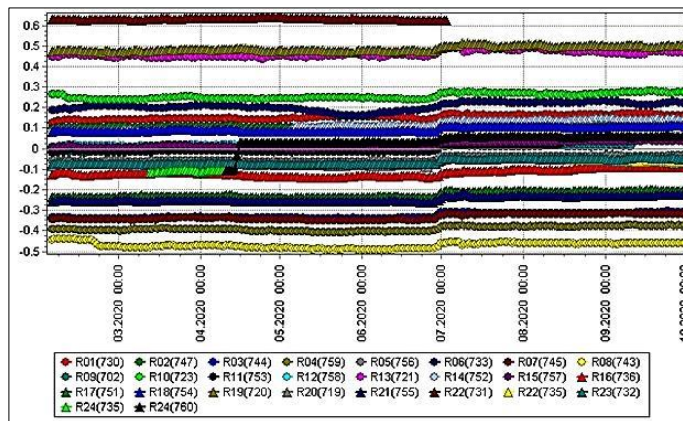


Рис. 3. Изменение межсигнальных *DCB* (C1C-C1P) по результатам обработки измерений приёмника SU04 (в метрах)

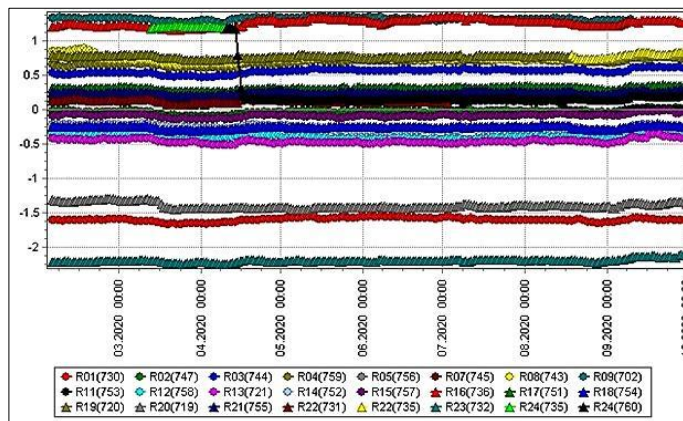


Рис. 4. Изменение межчастотных *DCB* (C1P-C2P) по результатам обработки измерений приёмника SU04 (в метрах)

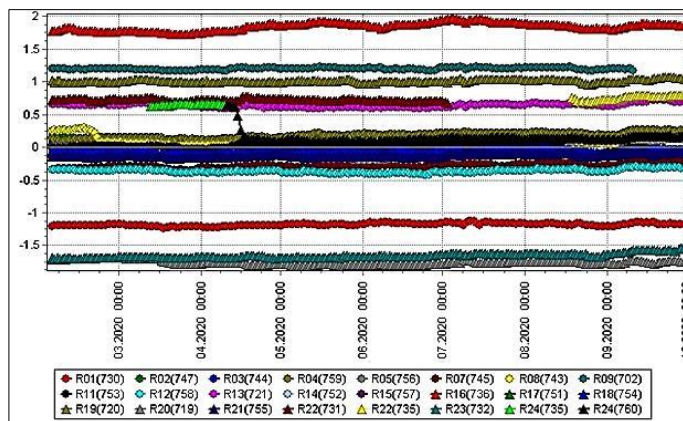


Рис. 5. Изменение межчастотных *DCB* (C1C-C2C) по результатам обработки измерений приёмника SU04 (в метрах)

Сравнение значений задержек  $\Delta t_n$ , переданных в навигационных сообщениях, с уточнёнными данными, полученными по результатам обработки приёмника SU04 (рис. 4–5), выявило их заметные отличия. Значения СКП при оценке взаимных отличий с исключением среднего на 01.08.2020 составляют для  $DCB_{C1P C2P}$  0,7 м, для  $DCB_{C1C C2C}$  — 1 м.

Таким образом, с появлением измерений калиброванного навигационного приёмника стало возможным оценить факторы, влияющие на «реальную» SISRE: наблюдаемые погрешности измерений средств наземного сегмента; наблюдаемые погрешности безионосферной комбинации измерений среднего по сети станций приёмника; наблюдаемые отклонения межсигнальных и межчастотных  $DCB$  относительно переданных в навигационных сообщениях. Принципиальным отличием оценки, проведённой в данной работе, является предварительное сведение апостериорной ЭВИ к требованиям ИКД [1], то есть пересчёт к номинальным фазовым центрам навигационных антенн и к измерениям  $C1P(C1C)$  в предположении, что рекомендуемые центрам анализа IGS фазовые центры антенн в диапазонах L1 и L2 совпадают и смещены в направлении на Землю относительно плоскости местного горизонта, проходящей через центр масс КА, на 2,0 м для КА «Глонасс-М» и 1,7 м для КА «Глонасс-К».

Для оценки использовались следующие исходные данные в виде суточных файлов:

- обобщённая ЭВИ из навигационных сообщений открытых НС ГЛОНАСС с частотным разделением на частоте L1 — штатная ЭВИ (BRDC);
- обобщённая ЭВИ из навигационных сообщений открытых НС ГЛОНАСС, в которой эфемериды пересчитаны к центру масс КА со смещением в радиальном направлении на 2,0 м для КА «Глонасс-М» и 1,7 м для КА «Глонасс-К»;
- апостериорная ЭВИ, отнесённая к усреднённому по сети станций приёмнику (набор IAC), содержащая координаты центра масс КА и поправки бортовых часов в фазовых центрах навигационных антенн, рекомендуемых IGS в формате ANTEX;
- апостериорная ЭВИ, согласованная по систематическим отклонениям поправок бортовых часов с обобщённой ЭВИ из навигационных сообщений на предшествующем скользящем 24-суточном интервале (набор IAC\_BRDC);
- систематические погрешности безионосферной комбинации измерений БИС обрабатываемой сети, включая приёмник SU04, по сигналам КА ГЛОНАСС относительно усреднённого по сети станций приёмника;
- систематические погрешности безионосферной комбинации измерений БИС обрабатываемой сети, включая приёмник SU04, по сигналам КА ГЛОНАСС относительно апостериорной ЭВИ, согласованной со штатной;

- дифференциальные кодовые смещения НС разных диапазонов КА и БИС (С1Р-С2Р, С1Р-С2С, С1С-С2Р, С1С-С2С), уточнённые с наложением ограничения нулевой взвешенной суммы смещений по всем КА ГЛОНАСС, уточнённые по измерениям всех доступных БИС и приёмника SU04;
- дифференциальные кодовые смещения НС одного диапазона КА и БИС (С1Р-С1С, С2Р-С2С) с наложением ограничения нулевой взвешенной суммы смещений по измерениям всех доступных БИС и приёмника SU04;
- смещения излучаемого навигационного радиосигнала поддиапазона L2 относительно навигационного радиосигнала поддиапазона L1 (ИКД [1]) из навигационных сообщений КА.

На интервале обработки, начиная с 25.01.2020, были выполнены расчёты по формированию в виде фалов SP3 нескольких наборов ЭВИ, сформированы разности наборов, характеризующие влияние различных факторов при оценке SISRE.

1. Апостериорная ЭВИ пересчитана к номинальным фазовым центрам навигационных антенн КА. Важно, что допущенные отклонения в перепривязке к фазовому центру приводят к неточностям при отдельной оценке отклонения орбиты КА и ЧВП, но не влияют на оценки SISRE. Соответственно получены наборы: C1PC2P\_IAC\_arhc — для апостериорной ЭВИ относительно среднего по сети станций приёмника и IAC\_BRDC\_arhc — для апостериорной ЭВИ, согласованной со штатной.
2. Апостериорные поправки бортовых часов ЭВИ пересчитаны к безионосферной комбинации измерений приёмника SU04 в предположении нулевых систематических погрешностей измерений для безионосферной комбинации C1PC2P. Затем поправки бортовых часов КА пересчитаны от измерений C1PC2P приёмника SU04 к измерениям C1P в соответствии с ИКД [1] с использованием значений  $\Delta\tau_n$ , переданных в навигационных сообщениях (набор C1P\_SU04\_afns). Проведено сравнение наборов ЭВИ IAC\_BRDC\_arhc и C1P\_SU04\_afns. Единственным источником разности этих наборов является отличие калибровок средства, к которому привязана штатная ЭВИ, от приёмника SU04.
3. Апостериорные поправки бортовых часов ЭВИ, пересчитанные к безионосферной комбинации измерений C1PC2P приёмника SU04, пересчитаны к измерениям C1P в соответствии с ИКД [1] с использованием DCB, уточнённых по измерениям приёмника SU04 (набор C1P\_SU04\_icd). Проведено сравнение наборов ЭВИ IAC\_BRDC\_arhc и C1P\_SU04\_icd. Источниками разности этих наборов являются отличие калибровок средства, к которому привязана штатная ЭВИ, от приёмника SU04, а также отклонения передаваемых в навигационных сообщениях значений  $\Delta\tau_n$  и значений, уточнённых по измерениям приёмника SU04.

4. Апостериорные поправки бортовых часов ЭВИ, пересчитанные к безионосферной комбинации измерений C1CC2C приёмника SU04, пересчитаны к измерениям C1C в соответствии с ИКД [1] с использованием значений  $\Delta\tau_n$ , передаваемых в навигационных сообщениях (набор C1C\_SU04\_afns). Проведено сравнение наборов ЭВИ IAC\_BRDC\_arhc и C1C\_SU04\_afns, которое показывает отличие ЭВИ для безионосферной комбинации C1CC2C от ЭВИ из навигационных сообщений.
6. Апостериорные поправки бортовых часов ЭВИ, пересчитанные к безионосферной комбинации измерений C1CC2C приёмника SU04, пересчитаны к измерениям C1C с использованием DCB, уточнённых по измерениям приёмника SU04 (набор C1C\_SU04\_icd). Проведено сравнение наборов ЭВИ IAC\_BRDC\_arhc и C1C\_SU04\_icd, которое показывает отличие ЭВИ для C1C и ЭВИ из навигационных сообщений.
7. Проведено сравнение наборов ЭВИ C1PC2P\_IAC\_arhc и IAC\_BRDC\_arhc. В действующем ИКД [1] не указано, как и для каких сигналов потребитель должен использовать передаваемые в навигационных сообщениях значения  $\Delta\tau_n$ . Поэтому в предположении, что средний по сети станций приёмник в некоторой степени соответствует «эталону», сравнение наборов C1PC2P\_IAC\_arhc и IAC\_BRDC\_arhc показывает наблюдаемые центрами IGS систематические отклонения ЭВИ ГЛОНАСС.
8. Апостериорные поправки бортовых часов ЭВИ, пересчитанные к фазовым центрам навигационных антенн, дополнительно пересчитаны к измерениям C1P с использованием значений  $\Delta\tau_n$ , передаваемых в навигационных сообщениях (C1P\_IAC\_afns). Проведено сравнение наборов C1P\_IAC\_arhc и IAC\_BRDC\_arhc. Источниками разности этих наборов в предположении, что средний по сети станций приёмник в наибольшей степени соответствует «эталону», являются систематические отклонения ЭВИ в навигационных сообщениях. Именно так систематические отклонения ЭВИ ГЛОНАСС наблюдались бы центрами IGS, если бы была опубликована уточнённая редакция ИКД [1], подразумевающая учёт  $\Delta\tau_n$  потребителем.
9. Проведено сравнение наборов ЭВИ C1P\_IAC\_arhc и C1P\_SU04\_afns, которое показывает отличие ЭВИ, рассчитанной для среднего по сети станций приёмника от приёмника SU04.

Схема формирования наборов ЭВИ приведена на рис. 6.

Полученные с 5-минутным шагом по времени файлы разностей наборов ЭВИ были дополнительно обработаны для формирования суточных значений ЭПД за счёт каждого фактора только по КА, пригодным к использованию по навигационным сообщениям.

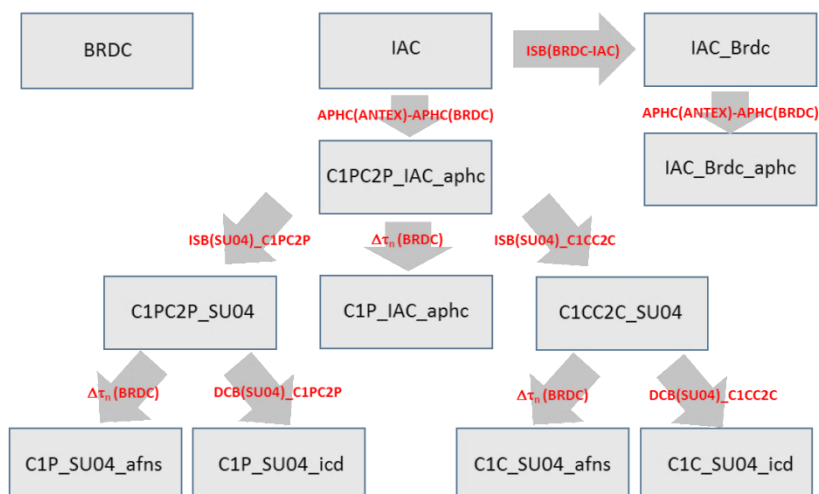


Рис. 6. Схема формирования наборов ЭВИ

### Анализ результатов

На рис. 7 приведён график изменения значений SISRE ГЛОНАСС, рассчитываемых в результате апостериорной обработки разностей наборов штатной ЭВИ (BRDC) и апостериорной ЭВИ, согласованной со штатной, (IAC\_BRDC\_aphc). Каждая точка на данном графике и далее — результат оценки SISRE на суточном интервале по всем КА ГЛОНАСС, излучающим сигналы в частотных диапазонах L1 и L2. Среднее значение на интервале 8 месяцев составляет около 1,27 м.

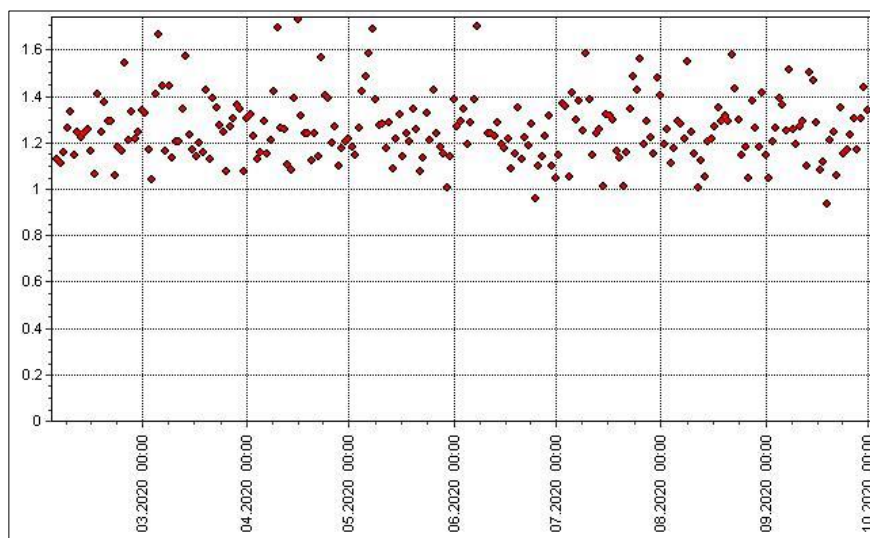


Рис. 7. Изменение SISRE ГЛОНАСС (BRDC — IAC\_BRDC\_aphc) (в метрах)



На рис. 8 приведён график изменения суточных значений разности поправок бортовых часов апостериорной ЭВИ наборов C1P\_SU04\_afns и IAC\_BRDC\_arhc. Высокая степень совпадения говорит о том, что штатная ЭВИ привязана именно к измерениям C1P со значениями смещений  $\Delta\tau_n$ , передаваемых в навигационных сообщениях. Заметные отклонения наблюдаются только для КА «Глонасс-735» в рабочей точке 22. В то же время практически для всех КА наблюдаются стабильные отклонения на уровне до 2 нс. График изменения значений SISRE ГЛОНАСС ( $\Delta$ ) при переходе от средства, к которому привязана ЭВИ в навигационных сообщениях, к приёмнику SU04 приведён на рис. 9. Использование безионосферной комбинации измерений C1PC2P приёмника SU04 в качестве «эталоны» практически не меняет оценку SISRE ГЛОНАСС, приведённую на рис. 7 и составляющую около 1,27 м. Ориентировочно увеличение SISRE составляет  $\sqrt{\text{SISRE}^2 + \Delta^2} - \text{SISRE} \approx \Delta^2 / (2 \cdot \text{SISRE})$ , то есть при  $\Delta$ , равной 0,3 м, увеличение SISRE около 3 см, а на интервале с сентября 2020 г. при  $\Delta$ , равной 0,5 м, увеличение SISRE около 10 см. Иными словами, оцениваемая SISRE ГЛОНАСС (рис. 7) почти полностью соответствует двухчастотному потребителю, использующему безионосферную комбинацию измерений C1PC2P, при условии идентичности калибровок его НАП и приёмника SU04.

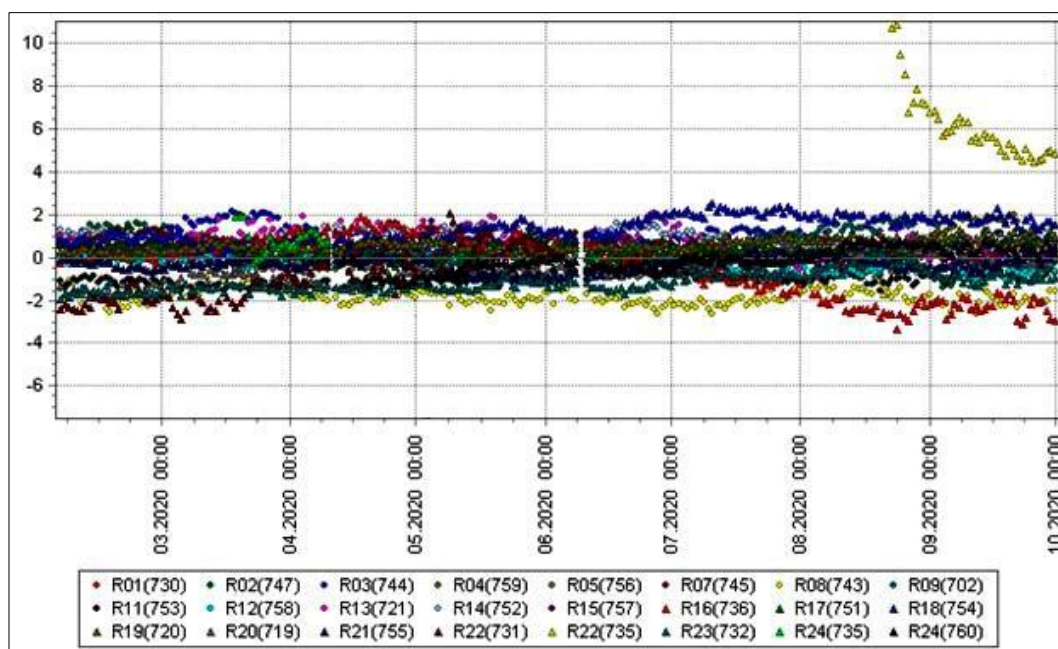


Рис. 8. Изменение разности поправок бортовых часов апостериорной ЭВИ (C1P\_SU04\_afns — IAC\_BRDC\_arhc) (в наносекундах)

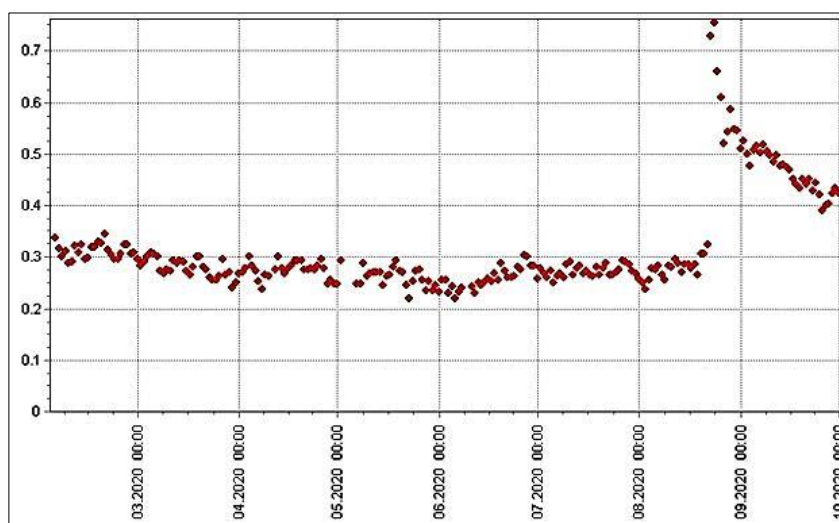


Рис. 9. Изменение SISRE ГЛОНАСС (C1P\_SU04\_afns — IAC\_BRDC\_aphc) (в метрах)

В то же время при использовании только одночастотных измерений C1P картина меняется из-за несоответствия значений межчастотных временных задержек  $\Delta\tau_n$ , передаваемых в навигационных сообщениях и уточнённых по измерениям приёмника SU04. На рис. 10 приведён график изменения значений SISRE ГЛОНАСС ( $\Delta$ ) при переходе к одночастотным измерениям C1P, полученных из разности наборов апостериорной ЭВИ (C1P\_SU04\_icd и IAC\_BRDC\_aphc). Среднее на интервале значение  $\Delta$ , равное 1,2 м, увеличивает оценку SISRE ГЛОНАСС для такого одночастотного потребителя до 1,75 м.

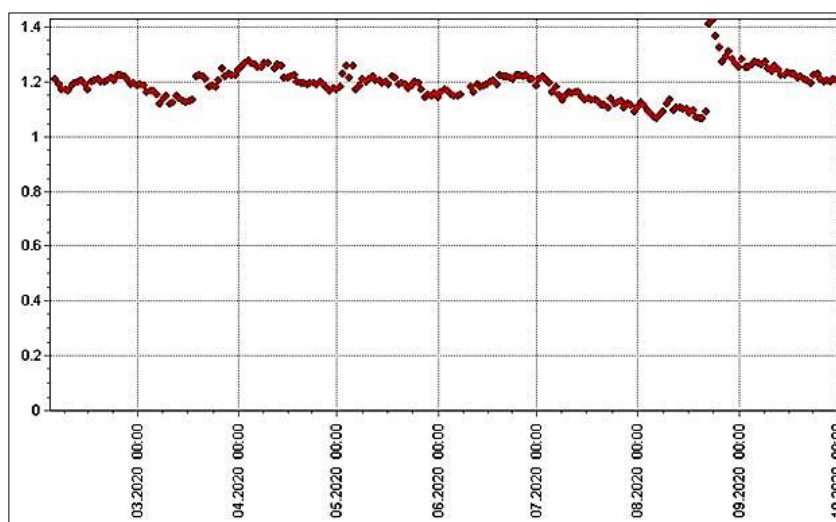


Рис. 10. Изменение SISRE ГЛОНАСС (C1P\_SU04\_icd — IAC\_BRDC\_aphc) (в метрах)

Из разности наборов апостериорной ЭВИ ( $C1C\_SU04\_afns$  и  $IAC\_BRDC\_arhc$ ) следует, что для двухчастотного потребителя, использующего безионосферную комбинацию измерений  $C1CC2C$ , при условии идентичности калибровок его НАП и приёмника  $SU04$ , SISRE ГЛОНАСС ( $\Delta$ ) при переходе от комбинации измерений  $C1PC2P$  к комбинации  $C1CC2C$  составляет  $\Delta \approx 0,95$  м (рис. 11). Соответственно для такого двухчастотного потребителя оценка SISRE ГЛОНАСС увеличивается до 1,65 м.

Самым массовым является потребитель, использующий одночастотные измерения  $C1C$ . Рассчитаны соответствующие разности наборов апостериорной ЭВИ ( $C1C\_SU04\_icd$  и  $IAC\_BRDC\_arhc$ ). При переходе к одночастотным измерениям  $C1C$  получается, что  $\Delta \approx 1,05$  м (рис. 12), что увеличивает оценку SISRE ГЛОНАСС для такого одночастотного потребителя до примерно 1,7 м.

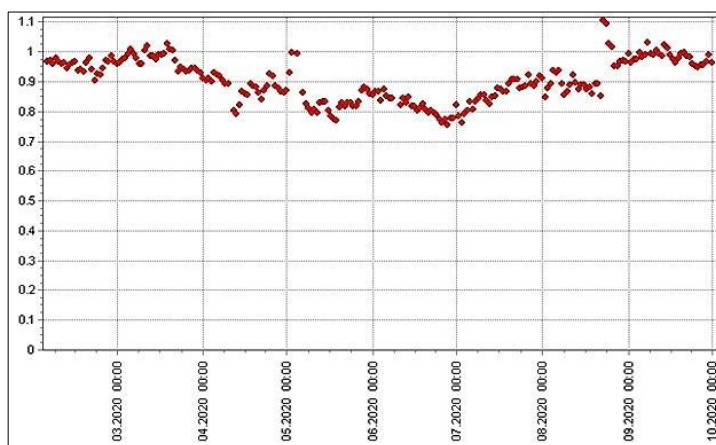


Рис. 11. Изменение SISRE ГЛОНАСС ( $C1C\_SU04\_afns - IAC\_BRDC\_arhc$ ) (в метрах)

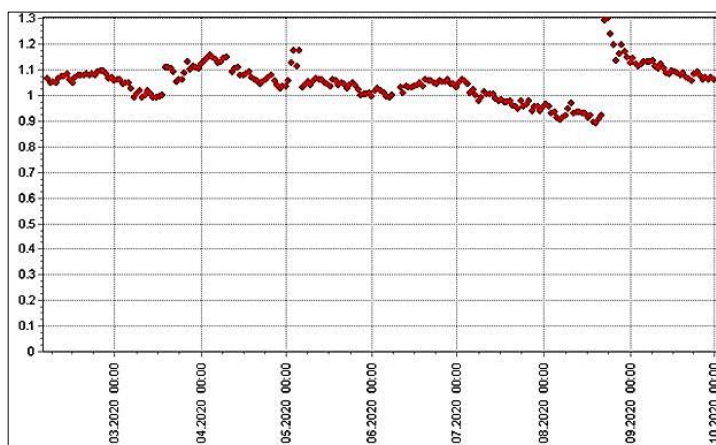


Рис. 12. Изменение SISRE ГЛОНАСС ( $C1C\_SU04\_icd - IAC\_BRDC\_arhc$ ) (в метрах)

Очевидно, что при уменьшении SISRE ГЛОНАСС до значений 0,5–0,7 м [3] неучтённые межсигнальные и межчастотные смещения НС становятся доминирующими, а потребители даже при калибровке своей НАП не смогут увидеть заметного повышения точности. Поэтому вопрос о передаче уточнённых значений  $\Delta t_n$ , а также и других временных задержек не менее важен, чем модернизация наземного сегмента и КА ГЛОНАСС.

Обычной практикой центров IGS является расчёт полного набора ЭВИ с использованием безионосферной комбинации измерений C1P2R. Несмотря на то, что апостериорные поправки бортовых часов КА ГЛОНАСС координатором центров анализа IGS не уточняются, решения нескольких центров, таких как ESA (European Space Agency), GFZ (German Research Centre for Geosciences), доступны. Для независимой оценки случайной составляющей погрешности определения поправок бортовых часов КА проведено сравнение апостериорной ЭВИ с соответствующей ЭВИ зарубежных центров, при этом на каждые сутки определялись средние значения разности поправок бортовых часов для каждого КА ГЛОНАСС (рис. 13–14).

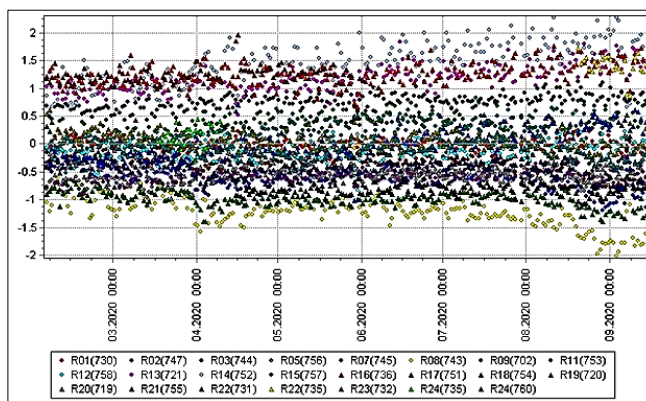


Рис. 13. Изменение средних суточных разностей поправок бортовых часов КА ГЛОНАСС, рассчитываемых центрами IGS и GFZ (в наносекундах)

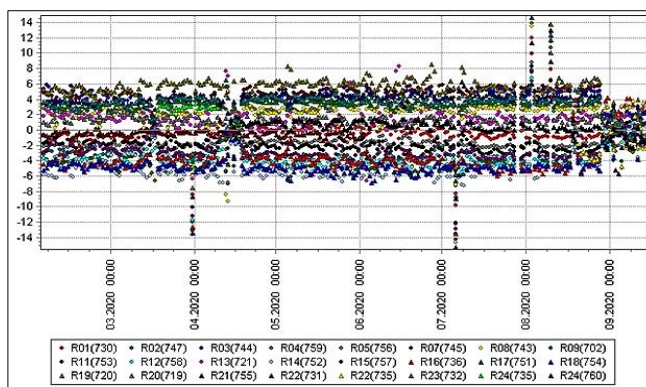


Рис. 14. Изменение средних суточных разностей поправок бортовых часов КА ГЛОНАСС, рассчитываемых центрами IGS и ESA (в наносекундах)

Из графика, приведённого на рис. 13, следует, что отклонения между поправками бортовых часов IAC и GFZ меньше, чем между апостериорной ЭВИ, пересчитанной к измерениям приёмника SU04 и к навигационным сообщениям (рис. 8). То есть составляющая в оценке SISRE ГЛОНАСС, обусловленная отклонениями данных IAC и GFZ, составляет  $\Delta < 25$  см. Из графика, приведённого на рис. 14, следует, что для отклонений данных IAC и ESA наблюдается значительное уменьшение с конца августа 2020 г. Учитывая большой набор (более 400) обрабатываемых разных навигационных приёмников в сети БИС, с некоторыми допущениями можно считать «эталонными» поправки бортовых часов КА, рассчитываемых IAC. Поскольку в действующем ИКД [1] нет явных указаний по использованию межчастотных смещений  $\Delta\tau_n$ , можно предположить, что в оценках SISRE ГЛОНАСС зарубежных центров IGS учитывается условие, что в ГЛОНАСС передаются аналогичные GPS частотно-временные параметры, то есть для безионосферной комбинации C1PC2P. В этом случае разность наборов апостериорной ЭВИ C1PC2P\_IAC\_arhc, не учитывающей смещения  $\Delta\tau_n$ , и IAC\_BRDC\_arhc может рассматриваться как дополнительная составляющая ( $\Delta$ ) к SISRE ГЛОНАСС, наблюдаемая зарубежными центрами IGS, оцениваемая  $\Delta \approx 2$  м (рис. 15). То есть вероятная SISRE ГЛОНАСС, оцениваемая зарубежными центрами IGS, составляет 2,4 м. Аналогичные результаты наблюдаются в ежесуточных оценках SISRE ГЛОНАСС при использовании апостериорной ЭВИ без согласования её с данными из навигационных сообщений штатной ЭВИ (рис. 16).

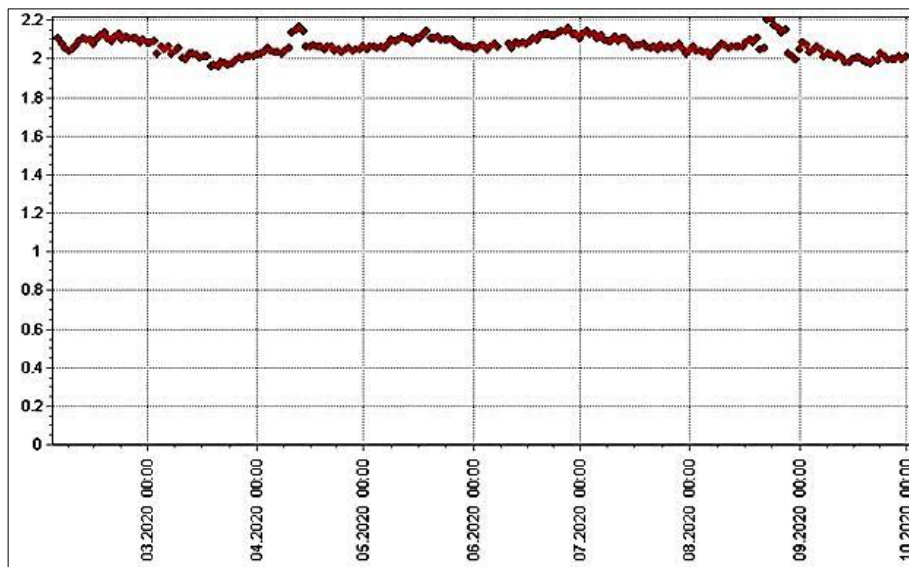


Рис. 15. Изменение SISRE ГЛОНАСС (C1PC2P\_IAC\_arhc — IAC\_BRDC\_arhc) (в метрах)

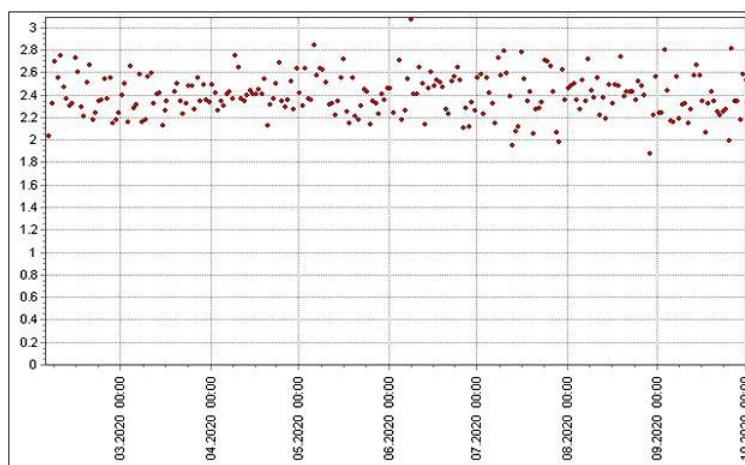


Рис. 16. Изменение SISRE ГЛОНАСС  
(вероятная оценка зарубежных центров IGS) (в метрах)

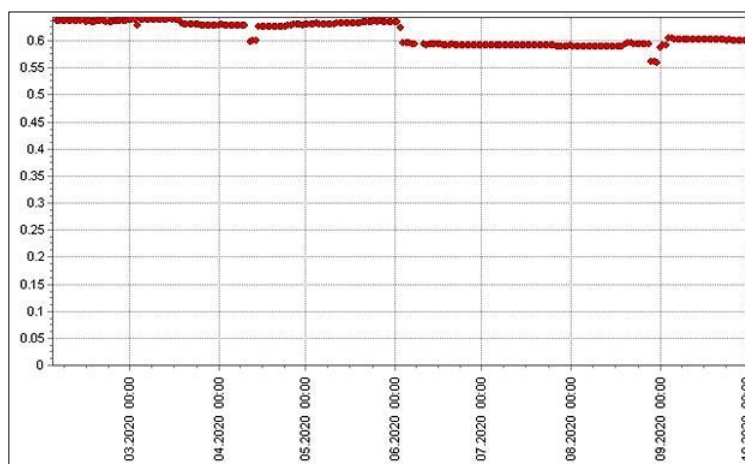


Рис. 17. Составляющая SISRE ГЛОНАСС, обусловленная отличием калибровочных поправок приёмника SU04 от среднего по сети станций приёмника (в метрах)

При условии уточнения ИКД [1], где необходимо явно указать, как использовать межчастотные смещения  $\Delta\tau_n$ , остаётся составляющая ( $\Delta$ ) SISRE ГЛОНАСС со значением около 0,6 м (рис. 17), обусловленная отличием калибровочных поправок приёмника SU04 от среднего по обрабатываемой сети станций приёмника, приведённых на рис. 1. С учётом имеющейся в БИС широкой номенклатуры навигационных модулей разных производителей (Javad, Trimble, Leica, Novatel, Topcon, Septentrio) калибровочные поправки среднего по сети станций приёмника не могут и не должны совпадать с калибровочными поправками приёмника SU04. В то же время их отличия существенны и во многих случаях превосходят отличия между калибровочными

поправками навигационных модулей различных производителей. Например, суточная на 01.08.2020 оценка средней квадратической погрешности (СКП), рассчитанной по отклонениям безионосферной комбинации С1РС2Р ГЛОНАСС относительно среднего по сети станций приёмника по более чем 400 БИС, составляет 0,85 м, а для приёмника SU04 соответственно 0,61 м. Взаимная СКП, рассчитанная по отклонениям безионосферной комбинации приёмника SU04 относительно глобально распределённых БИС с навигационными модулями разных производителей и модификаций с разными версиями ПО только для модулей Javad TRE\_G3T, составляет 0,23 м, для остальных — превышает 0,31 м. То есть в глобальной сети БИС нет ни одного приёмника, «аналогичного» приёмнику SU04, либо для которого оценки СКП не превышали бы 2 нс (около 0,6 м).

На рис. 18 представлен график значений СКП, рассчитанных по отклонениям безионосферной комбинации С1РС2Р ГЛОНАСС более 400 БИС, скорректированной на смещение  $\Delta\tau_n$ , относительно ЭВИ ГЛОНАСС из навигационных кадров на 01.08.2020. Согласно графику, приведённому на рис. 9, где фактически эта же погрешность измерений приёмника SU04 трансформирована в SISRE с пересчётом эфемерид КА, ожидаемое значение СКП составляет 0,25 м. Примерно такое же значение СКП (0,24 м) и получилось для приёмника SU04 по всем пригодным КА ГЛОНАСС (рис. 18). Это минимальное значение СКП из всех БИС обрабатываемой сети. Другими словами, ни по одной другой БИС обрабатываемой сети невозможно без учёта дополнительных калибровочных поправок получить поправки бортовых часов КА ГЛОНАСС, согласующиеся с данными из навигационных сообщений на уровне приёмника SU04.

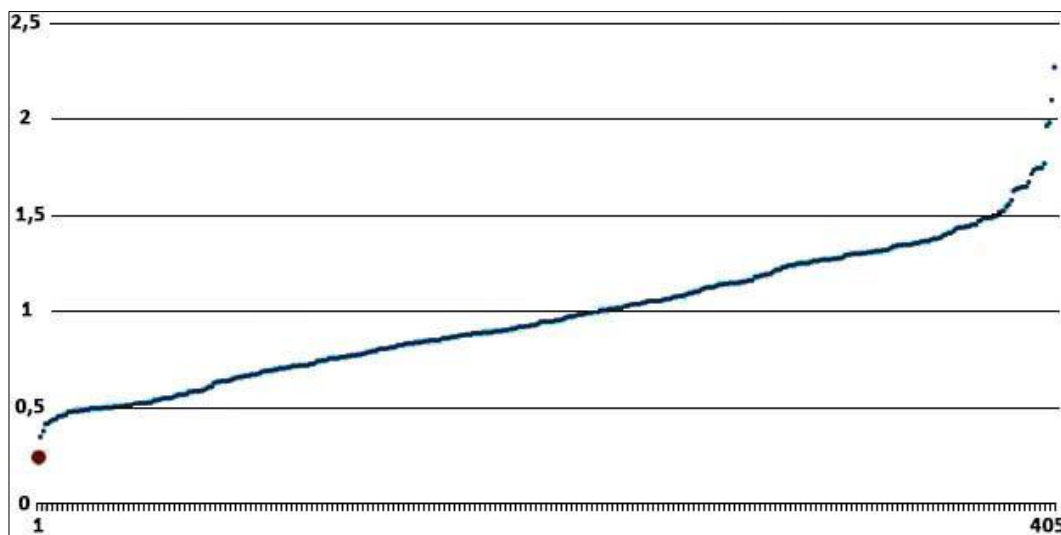


Рис. 18. Значения СКП БИС, рассчитанные по отклонениям безионосферной комбинации С1РС2Р относительно ЭВИ ГЛОНАСС (SU04 — первый из 406 БИС) (в метрах)

### Заключение

Доступность измерений калиброванного навигационного приёмника SU04 позволила оценить влияние межсигнальных и межчастотных смещений навигационных сигналов ГЛОНАСС на оценку SISRE. Это было сделано с использованием новой методики, предполагающей пересчёт апостериорной ЭВИ к определяемой в соответствии ИКД [1] с учётом его уточнения, с различными значениями межчастотных смещений  $\Delta\tau_n$ , как передаваемых в навигационных сообщениях, так и уточнённых. Пересчитанная апостериорная ЭВИ может рассматриваться как некоторая «эталонная», согласованная со штатной ЭВИ, с отсутствующими ошибками прогноза.

Систематические погрешности перекрестных безионосферных комбинаций измерений приёмника SU04 были определены относительно апостериорной ЭВИ и, как следствие, получены ежесуточные взаимные отклонения приёмника SU04 для каждого КА ГЛОНАСС относительно любой БИС из обрабатываемой глобальной сети станций. Дополнительно были определены дифференциальные кодовые межсигнальные и межчастотные смещения навигационных сигналов (DCB). Установлено, что все систематические отклонения стабильны по времени, а их флуктуации значительно меньше случайной составляющей погрешности кодовых измерений, то есть фактически не требуется их ежесуточное определение, по крайней мере, до появления изменений в бортовой аппаратуре КА. С учётом вычисленных систематических отклонений и использования номинальных положений фазовых центров навигационных антенн ЧВП могут быть пересчитаны к любому типу измерений любого навигационного приёмника или группы приёмников. Такой пересчёт к приёмнику SU04 позволил оценить SISRE ГЛОНАСС в зависимости от используемых потребителем измерений: C1P2C2P ~ 1,35 м; C1P ~ 1,75 м; C1CC2C ~ 1,65 м; C1C ~ 1,7 м.

Показано, что передаваемая в навигационных сообщениях ЭВИ ГЛОНАСС имеет наименьшую погрешность для двухчастотного потребителя, использующего безионосферную комбинацию измерений C1P2C2P (в обозначениях [5]), при условии идентичности калибровок его НАП и приёмника SU04, используемого в качестве «эталонного». Использование потребителем других измерений неизбежно ведёт к ухудшению его точности не только из-за наличия межсигнальных и межчастотных смещений навигационных сигналов, но и из-за недостаточно точных значений  $\Delta\tau_n$ , передаваемых в навигационных сообщениях.

Учитывая неизбежное снижение значения SISRE при модернизации ГЛОНАСС, планируемую передачу в навигационном сигнале модели ионосферы, а также наблюдаемое снижение литерной зависимости в НАП, в обозримом будущем межсигнальные и межчастотные временные задержки будут фактически определять уровень SISRE, а, следовательно, и точность



потребителя. Наличие калиброванного навигационного приёмника, используемого в качестве «эталонного», позволяет не только контролировать стабильность временных задержек бортовой аппаратуры КА, но и пересчитывать ЧВП для любого типа измерений потребителя.

Необходимо оперативное уточнение ИКД [1] для обеспечения передачи потребителю в навигационных сообщениях и правильного использования им сведений о смещениях навигационных сигналов, что потребует времени как на уровне согласования ИКД, так и на уровне реализации бортового ПО и ПО НАП. Реализация этих изменений способна существенно повысить точность потребителя в интересах повышения конкурентоспособности ГЛОНАСС.

В рамках международного сотрудничества целесообразна независимая оценка калибровочных поправок «эталонного» навигационного приёмника и предоставление возможности аналогичной калибровки для производителей НАП. Доступность измерений такого приёмника в IGMА позволила бы согласовать оценки SISRE между различными центрами IGS и оценить остаточные отклонения.

### Список литературы

1. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. Редакция 5.1. — Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения, 2008.
2. Аржанников А.А., Карутин С.Н., Кожин А.Л., Митрикас В.В., Панов С.А., Скакун И.О., Янишевский В.В. Пути повышения точностных характеристик системы ГЛОНАСС // Доклады конференции КВНО-2019. — СПб.: ИПА РАН.
3. Schaer S. SINEX BIAS – Solution (Software/technique) Independent Exchange Format for GNSS Biases. Version 1.00 [Electronic resource]. — URL: [http://ftp.aiub.unibe.ch/bcwg/format/draft/sinex\\_bias\\_100\\_feb07.pdf](http://ftp.aiub.unibe.ch/bcwg/format/draft/sinex_bias_100_feb07.pdf).
4. Global Positioning System: Theory & Application // Bradford W. Parkinson, James J. Spilker (editors). — USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, 1996. — 793 p.
5. RINEX The Receiver Independent Exchange Format. Version 3.04. International GNSS Service (IGS), (RTCM-SC104) [Electronic resource]. — RINEX Working Group and Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104, 2018 — URL: <http://acc.igs.org/misc/rinex304.pdf>.

*Статья поступила в редакцию: 09.03.2021 г.*

*Статья прошла рецензирование: 26.03.2021 г.*

*Статья принята в работу: 01.04.2021 г.*