

СОГЛАСОВАНО

**Первый заместитель генерального
директора - заместитель по научной
работе ФГУП «ВНИИФТРИ»**

А.Н. Щипунов

«28 » декабря 2023 г.

M.p.



Государственная система обеспечения единства измерений

Изделия БИК СБИС-А

Методика поверки

МП 8501-23-06

**р.п. Менделеево
2023 г.**

Общие сведения

1.1 Настоящая методика поверки применяется для поверки изделий БИК СБИС-А (далее – изделия), изготовленных акционерным обществом «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь» (АО «НПП «Радиосвязь») г. Красноярск, применяемых в качестве рабочих средств измерений, и устанавливает методику их первичной и периодической поверки.

1.2 Реализация данной методики поверки обеспечивает прослеживаемость к:

- Государственному первичному эталону единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2022 в соответствии с Государственной поверочной схемой для средств измерений времени и частоты, утвержденной приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 сентября 2022 года № 2360;

- Государственному первичному специальному эталону единицы длины ГЭТ 199-2018 в соответствии с Государственной поверочной схемой для координатно-временных измерений, утвержденной приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 декабря 2018 года № 2831.

1.3 Реализация данной методики поверки обеспечивается применением прямого метода измерений.

1.4 В результате поверки должны быть подтверждены следующие метрологические требования, приведенные в таблице 1.

Таблица 1

Наименование характеристики	Значение
Пределы допускаемой абсолютной систематической погрешности измерений беззапросной дальности по дальномерным кодам сигналов космических аппаратов ГЛОНАСС, м	$\pm 0,36$
Предел допускаемого среднего квадратического отклонения измерения беззапросной дальности на интервале времени осреднения 30 с, м: - по дальномерным кодам сигналов КА ГЛОНАСС L1SC, L2SC, L3OC - по дальномерным кодам сигналов КА ГЛОНАСС L1OC, L2OC, L1OF, L2OF	0,07 0,14
Предел допускаемого среднего квадратического отклонения измерения беззапросной дальности по фазе несущей навигационного сигнала на интервале времени осреднения 30 с, м	0,0009
Предел допускаемого среднего квадратического отклонения измерения радиальной беззапросной скорости на интервале времени осреднения 30 с, м/с	0,004
Пределы допускаемой относительной погрешности по частоте формируемых сигналов	$\pm 1 \cdot 10^{-13}$
Пределы допускаемой погрешности синхронизации формируемой шкалы времени изделия со шкалой времени системы ГЛОНАСС, нс	± 250
Нестабильность (среднее квадратическое относительное двухвыборочное отклонение) частоты формируемых сигналов при интервале времени измерения 1 сутки	$4 \cdot 10^{-15}$
Доверительные границы допускаемой абсолютной погрешности (при доверительной вероятности 0,95) измерения температуры в диапазоне от -50 до +60 °C, °C	$\pm 0,5$
Доверительные границы допускаемой абсолютной погрешности (при доверительной вероятности 0,95) измерения относительной влажности в диапазоне от 0 до 100%, %	± 5
Доверительные границы допускаемой абсолютной погрешности (при доверительной вероятности 0,95) измерения атмосферного давления в диапазоне от 600 до 1100 гПа, гПа	$\pm 0,1$

2 Перечень операций поверки

2.1 При проведении поверки должны быть выполнены операции, указанные в таблице 2.

Таблица 2

Наименование операции поверки	Обязательность выполнения операций поверки при		Номер раздела (пункта) методики поверки, в соответствии с которым выполняется операция поверки
	первой	периодической	
Внешний осмотр	да	да	7
Проверка программного обеспечения	да	да	8
Подготовка к поверке и опробование	да	да	9
Определение метрологических характеристик и подтверждение соответствия средства измерений метрологическим требованиям	-	-	10
Определение абсолютной систематической погрешности измерений беззапросной дальности по дальномерным кодам сигналов космических аппаратов ГЛОНАСС	да	да	10.1
Определение среднего квадратического отклонения измерения беззапросной дальности на интервале времени осреднения 30 с	да	да	10.2
Определение погрешности синхронизации формируемой шкалы времени изделия со шкалой времени системы ГЛОНАСС	да	да	10.3
Определение относительной погрешности по частоте формируемых сигналов	да	да	10.4
Определение нестабильности (среднего квадратического относительного двухвыборочного отклонения (далее – СКДО)) частоты формируемых сигналов при интервале времени измерения 1 сутки	да	да	10.5
Определение абсолютной погрешности (при доверительной вероятности 0,95) измерения температуры в диапазоне от -50 до +60 °C	да	да	10.6
Определение абсолютной погрешности (при доверительной вероятности 0,95) измерения относительной влажности в диапазоне от 0 до 100%	да	да	10.7
Определение абсолютной погрешности (при доверительной вероятности 0,95) измерения атмосферного давления в диапазоне от 600 до 1100 гПа	да	да	10.8

2.2 При получении отрицательных результатов при выполнении любой из операций поверка прекращается и изделие бракуется.

3 Требования к условиям проведения поверки

3.1 Проверка проводится в рабочих условиях эксплуатации поверяемых изделий и используемых средств поверки.

4 Требования к специалистам, осуществляющим поверку

4.1 К проведению поверки допускается инженерно-технический персонал со средним или высшим техническим образованием, являющийся специалистами органа метрологической службы, юридического лица или индивидуального предпринимателя, аккредитованного на право проведения поверки, непосредственно осуществляющие поверку средств измерений.

4.2 Персонал, проводящий поверку, должен быть ознакомлен с руководством по эксплуатации (далее – РЭ) изделий и настоящей методикой поверки.

4.3 Проверку выполнения требований разделов 7, 8, 9 допускается проводить посредством анализа фото- и видеоматериалов, видеоконференции, видеосвязи.

4.4 Проверку выполнения требований разделов 10.1 – 10.5 допускается проводить посредством обработки измерительной информации с изделияя.

5 Метрологические и технические требования к средствам поверки

5.1 При проведении поверки применяют средства измерений и вспомогательное оборудование, указанные в таблице 3.

Таблица 3

Операции поверки, требующие применение средств поверки	Метрологические и технические требования к средствам поверки, необходимые для проведения поверки	Перечень рекомендуемых средств поверки
п.10 Определение метрологических характеристик и подтверждение соответствия средства измерений метрологическим требованиям	Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2022 в соответствии с приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 сентября 2022 года № 2360: доверительные границы относительной неисключенной систематической погрешности воспроизведения единиц при уровне доверительной вероятности 0,99 не более $5,0 \cdot 10^{-16}$	ГЭТ 1-2022

Продолжение таблицы 3

Операции поверки, требующие применение средств поверки	Метрологические и технические требования к средствам поверки, необходимые для проведения поверки	Перечень рекомендуемых средств поверки
п.10 Определение метрологических характеристик и подтверждение соответствия средства измерений метрологическим требованиям	Средства измерений температуры: диапазон измерений от -70 до +150 °C, пределы допускаемой абсолютной погрешности ±0,03 °C (в диапазоне измерения от -70 до -60 °C); ±0,02 °C (в диапазоне измерения от -60 до 0 °C); ±0,01 °C (в диапазоне измерения от 0 до +30 °C); ±0,02 °C (в диапазоне измерения от +30 до +150 °C)	Термометр сопротивления платиновый вибропрочный эталонный ПТСВ-2К-2, рег.№ 23040-14
	Средства воспроизведения задаваемых значения относительной влажности: диапазон воспроизведения относительной влажности от 0 до 100%, пределы допускаемой абсолютной погрешности воспроизведения относительной влажности ±0,5 % в диапазоне от 5% до 95%, ±1% в диапазоне от 0% до 5 и от 95% до 100%	Генератор влажного воздуха HygroGen 2 в составе с гигрометром точки росы Michell Instruments Optidew Vision, рег.№ 32405-11
	Средства измерений атмосферного давления: диапазон измерений атмосферного давления от 500 до 1100 гПа, пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений атмосферного давления ±0,1 гПа	Барометр цифровой РТВ330, рег.№ 42508-09

Вспомогательные средства

п.10 Определение метрологических характеристик и подтверждение соответствия средства измерений метрологическим требованиям	Среднее квадратическое относительное двухвыборочное отклонение частоты выходного сигнала на интервале времени измерений (t) $t = 1$ с не более $5 \cdot 10^{-13}$, $t = 10$ с не более $2 \cdot 10^{-13}$	Стандарт частоты и времени водородный Ч1-1007, рег. № 40466-09
	Разрешающая способность измерений временного интервала 20 пс	Частотомер 53230А, рег. № 51077-12
	1 Гц с выхода аппаратуры формирования шкалы времени	Кабель подачи сигнала
	Диапазон воспроизводимых температур воздуха от -70 до +150 °C, неравномерность распределения температурного поля ±0,5 °C, диапазон воспроизводимых значений влажности от 20 до 95 %, нестабильность поддержания относительной влажности ±2,5 %	Климатическая камера М-70/150-1000КТВХ
	Диапазон воспроизведения давления от 500 до 1100 гПа	Камера барометрическая ФАЗ.002.002.000

Продолжение таблицы 3

Примечания:

- 1) Необходимость использования вспомогательных средств определяется выбранным методом проведения операции поверки
- 2) Допускается использовать при поверке другие утвержденные и аттестованные эталоны единиц величин, средства измерений утвержденного типа и поверенные, удовлетворяющие метрологическим требованиям, указанным в таблице. Все средства поверки должны быть исправны, поверены или аттестованы в соответствии с действующим законодательством

6 Требования по обеспечению безопасности проведения поверки

6.1 При проведении поверки должны быть соблюдены требования безопасности в соответствии с ГОСТ 12.3.019-80.

6.2 При проведении поверки необходимо принять меры защиты от статического напряжения, использовать антистатические заземленные браслеты и заземлённую оснастку.

7 Внешний осмотр средства измерений

7.1 При внешнем осмотре (визуально или посредством анализа фото- и видеоматериалов, видеоконференции (видеосвязи)) проверить:

- отсутствие механических повреждений и ослабления элементов, четкость фиксации их положения;
- чёткость обозначений, чистоту и исправность разъёмов и гнёзд, наличие и целостность печатей и пломб;
- наличие маркировки согласно требованиям эксплуатационной документации.

7.2 Результаты поверки считать положительными, если выполняются требования п. 7.1.

8 Проверка программного обеспечения (ПО)

8.1 Выполнить запуск утилиты «СПО» (утилиту «СПО» предоставляет заказчик поверки изделия), выполнить соединение с БПВ из состава БИК СБИС-А, выбрать вкладку «Состояние БПВ», в открывшемся окне появиться информация, характеризующая программное обеспечение (далее – ПО) измерительного средства – БПВ из состава БИК СБИС-А. Убедиться, что имеющиеся на открывшейся странице в строках «Версия программного обеспечения ИС» и «Прошивка ПЛИС ИС» идентификационные данные (признаки) ПО соответствуют значениям, указанным в таблице 4.

Таблица 4

Идентификационные данные (признаки)	Значение	
Идентификационное наименование ПО	ПО ИС (БПВ)	Прошивка ПЛИС ИС (БПВ)
Номер версии (идентификационный номер ПО)	не ниже 20230703	не ниже 20200804

8.3 Результаты поверки считать положительными, если идентификационные данные ПО соответствуют данным, указанным в таблице 4.

9 Подготовка к поверке и опробование

9.1 Подготовка к поверке

9.1.1 Перед проведением поверки необходимо выполнить следующие подготовительные работы:

- выполнить операции, оговоренные в РЭ поверяемого изделия по подготовке его к работе (перевод изделия в режим «Проверка» (при необходимости) осуществляет Заказчик поверки изделия);
- выполнить операции, оговоренные в РЭ на применяемые средства поверки по их подготовке к измерениям;
- осуществить прогрев приборов для установления их рабочих режимов.

9.2 Опробование

9.2.1 Результаты опробования считать положительными, если визуально (или посредством анализа фото- и видеоматериалов, видеоконференции (видеосвязи)) подтверждено, что на всех составных частях изделия не горят индикаторы «Отказ», «Ошибка» (при их наличии).

10 Определение метрологических характеристик и подтверждение соответствия средства измерений метрологическим требованиям

10.1 Определение абсолютной систематической погрешности измерений беззапросной дальности по дальномерным кодам сигналов космических аппаратов ГЛОНАСС

В случае доставки эталона к месту эксплуатации изделия или в случае доставки изделия к месту эксплуатации эталона

10.1.1 Собрать схему в соответствии с рисунком 1 (подачу сигнала 1 Гц (кабель) от аппаратуры формирования шкалы времени УЭ2.084.048 на вход рабочего эталона обеспечивает Заказчик поверки изделия).



Рисунок 1 - Схема проведения измерений при определении абсолютной систематической погрешности измерений беззапросной дальности в случае доставки эталона к месту эксплуатации изделия или в случае доставки изделия к месту эксплуатации эталона

10.1.2 Убедиться, что изделие и рабочий эталон настроены на запись измерений текущих навигационных параметров по сигналам принимаемых НКА ГЛОНАСС: интервал измерений 30 с (каждое измерение в файле получено в результате усреднения на 30 секундном интервале), интервал наблюдения 1 сутки (00:00:00 – 23:59:30). Запись измерений должна осуществляться согласно правилам, изложенным в международном стандарте RINEX (версия не ниже 2.11). Запись измерений в файле RINEX должна быть 1 раз в 30 секунд (усредненные 30-секундные измерения на моменты времени кратные 30 секундам по системной шкале времени GPS для обеспечения согласованности используемой эфемеридно-временной информации формата .sp3 и .clk).

Провести одновременные измерения изделием (двумя полукомплектами) и рабочим эталоном в течение не менее 15 суток. По результатам измерений получить суточные файлы формата RINEX (версия не ниже 2.11), содержащие результаты измерений псеводальности по

сигналам с открытым доступом (OF – open frequency, OC – open codes) НКА системы ГЛОНАСС (L1, L2, L3) (файлы измерений в формате RINEX предоставляет Заказчик поверки средства измерений).

10.1.3 Определить разности результатов измерений псевдодальностей, измеренных одновременно изделием и рабочим эталоном по сигналам системы ГЛОНАСС для каждого полукомплекта, по формуле (1):

$$\Delta S(i, k) = S_{\text{СБИС}}(i, k) - S_{\text{РЭ}}(i, k) - \Delta R(i, k) - c \cdot \Delta T1 , \quad (1)$$

где $S_{\text{СБИС}}$ – значение псевдодальности испытываемого изделия, измеренное по коду навигационного сигнала, м;

$S_{\text{РЭ}}$ – значение псевдодальности, измеренное рабочим эталоном, м;

i – порядковый номер измерения;

k – номер литеры несущей частоты НКА ГЛОНАСС;

c – скорость света равная 299 792 458 м/с;

$\Delta T1$ – показания частотомера с учетом задержки в соединительных кабелях 1 Гц, с;

$\Delta R(i, k)$ – разности геометрических дальностей при распространении навигационного сигнала от НКА до фазового центра антенны изделия и рабочим эталоном, определяемые по формуле (2):

$$\Delta R(i, k) = R_1(i, k) - R_2(i, k) = \sqrt{(X_1 - X_{\text{НКА}}(i, k))^2 + (Y_1 - Y_{\text{НКА}}(i, k))^2 + (Z_1 - Z_{\text{НКА}}(i, k))^2} - \sqrt{(X_2 - X_{\text{НКА}}(i, k))^2 + (Y_2 - Y_{\text{НКА}}(i, k))^2 + (Z_2 - Z_{\text{НКА}}(i, k))^2} , \quad (2)$$

где X_1, Y_1, Z_1 – координаты фазового центра антенны изделия;

X_2, Y_2, Z_2 – координаты фазового центра антенны рабочего эталона;

$X_{\text{НКА}}(i, k), Y_{\text{НКА}}(i, k), Z_{\text{НКА}}(i, k)$ – координаты НКА, рассчитываемые системой контроля и подтверждения характеристик радионавигационного поля системы ГЛОНАСС в интересах гражданских потребителей, публикуемые в открытом доступе на сайте информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) АО «ЦНИИмаш» (<ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/>).

Разности псевдодальностей определить по сигналам системы ГЛОНАСС для литер рабочих частот от -7 до 6 в диапазонах частот L1 и L2 по фазе дальномерного кода и на частоте L3.

10.1.4 На интервале времени нахождения навигационного космического аппарата в зоне радиовидимости изделия определить систематическую составляющую погрешности измерений псевдодальности до навигационного космического аппарата КНС ГЛОНАСС по формуле (3):

$$\Delta S(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta S(i, k) , \quad (3)$$

Систематические погрешности измерений псевдодальности до навигационных космических аппаратов КНС ГЛОНАСС определить для литер от минус 7 до 6 в частотных диапазонах L1 и L2 и на частоте L3 (одно значение на любом суточном интервале для каждого НКА).

В случае размещения изделия и эталона на местах их эксплуатации

10.1.5 Собрать схему в соответствии с рисунком 2.

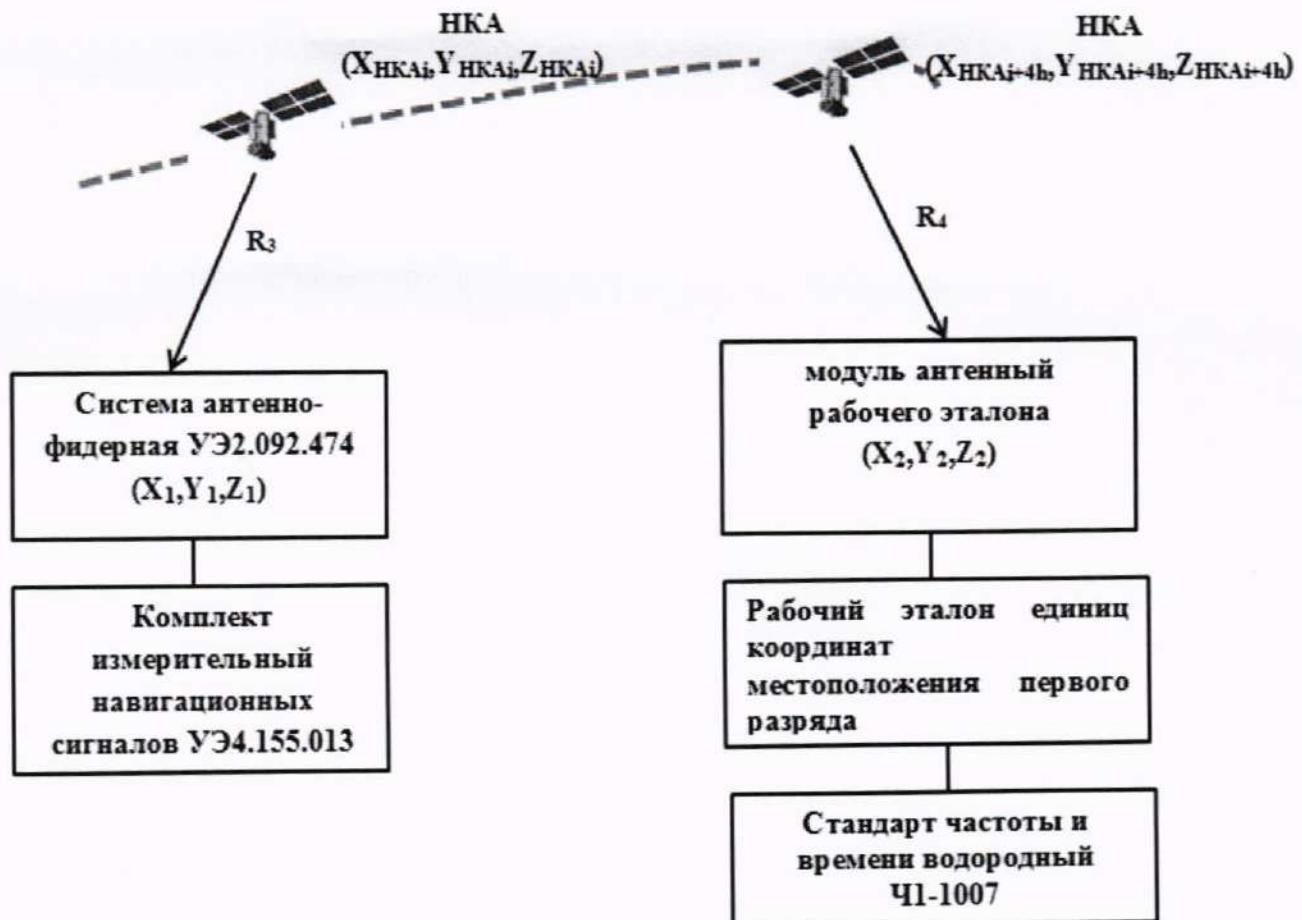


Рисунок 2 - Схема проведения измерений при определении абсолютной систематической погрешности измерений беззапросной дальности в случае размещения изделия и эталона на местах их эксплуатации

10.1.6 Убедиться, что изделие и рабочий эталон настроены на запись измерений текущих навигационных параметров по сигналам принимаемых НКА ГЛОНАСС: интервал измерений 30 с, интервал наблюдения 1 сутки (00:00:00 – 23:59:30). Запись измерений должна осуществляться согласно правилам, изложенным в международном стандарте RINEX (версия не ниже 2.11). Запись измерений в файле RINEX должна быть 1 раз в 30 секунд (усредненные 30-секундные измерения на моменты времени кратные 30 секундам по системной шкале времени GPS для обеспечения согласованности используемой эфемеридно-временной информации формата .sp3 и .clk, данных ионосферных карт).

Провести измерения изделием (двумя полукомплектами) и рабочим эталоном в течение не менее 15 суток. По результатам измерений получить суточные файлы формата RINEX, содержащие результаты измерений псевдодальности по сигналам с открытым доступом (OF – open frequency, OC – open codes) НКА системы ГЛОНАСС (L1, L2, L3) (файлы измерений в формате RINEX предоставляет Заказчик поверки средства измерений). Последовательно обработать каждый суточный файл для определения положения шкалы времени поверяемого средства измерений относительно системной шкалы времени GPS, значения зенитной тропосферной задержки сигналов методом Precise Point Positioning PPP (по формулам Приложения А, п. А.2-А.3).

10.1.7 Определить разности псевдодальностей, измеренные изделием и рабочим эталоном по сигналам системы ГЛОНАСС для каждого полукомплекта, по формуле (4):

$$\Delta S(j, k) = S_{\text{СБИС}}(i, k) - S_{\text{РЭ}}(i + h, k) - R_{\text{СБИС}}(i, k) + R_{\text{РЭ}}(i + h, k) - \Delta T2(k) - \Delta T3(k) - \Delta T4(k) , \quad (4)$$

где $S_{СБИС}(i,k)$ – значение псевдодальности, измеренное испытываемым изделием, измеренное по коду навигационного сигнала в i -ый момент времени;

$S_{PЭ}(i+h,k)$ – значение псевдодальности, измеренное рабочим эталоном в момент времени $(i+h)$;

i – моменты начала наблюдения НКА испытываемым изделием;

h – моменты времени наблюдения НКА рабочим эталоном;

k – литеры рабочих частот системы ГЛОНАСС;

$\Delta T2(k)$ – разность шкалы времени НКА ГЛОНАСС на моменты времени i и $i+h$ (выражено в метрах) (значения шкалы времени НКА ГЛОНАСС рассчитываются комплексом адаптируемым высокоточным автоматизированных программно-аппаратных средств и публикуются в открытом доступе на сайте информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) АО «ЦНИИмаш» (<ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/>);

$\Delta T3(k)$ – разность задержек сигналов в ионосфере для изделия на момент времени i и рабочего эталона на момент времени $i+h$ (значения задержек сигналов в ионосфере определяются по модели, Приложение А, п. А.5);

$\Delta T4(k)$ – разность задержек сигналов в тропосфере для изделия на момент времени i и рабочего эталона на момент времени $i+h$ (значения задержек сигналов в тропосфере определяются по модели, Приложение А, п. А.4);

$R_{СБИС}(i,k)$ – геометрическая дальность при распространении навигационного сигнала от НКА до фазового центра антенны изделия, определяемые по формуле (5):

$$R_{СБИС}(i,k) = \sqrt{(X_1 - X_{HKA}(i,k))^2 + (Y_1 - Y_{HKA}(i,k))^2 + (Z_1 - Z_{HKA}(i,k))^2} , \quad (5)$$

где X_1, Y_1, Z_1 – координаты фазового центра антенны изделия;

$X_{HKA}(i,k), Y_{HKA}(i,k), Z_{HKA}(i,k)$ – координаты НКА, рассчитываемые на момент времени i комплексом адаптируемым высокоточным автоматизированных программно-аппаратных средств и публикуемые в открытом доступе на сайте информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) АО «ЦНИИмаш» (<ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/>);

$R_{PЭ}$ – геометрическая дальность при распространении навигационного сигнала от НКА до фазового центра антенны приемника из состава рабочего эталона, определяемые по формуле (6):

$$R_{PЭ}(i+h,k) = \sqrt{(X_2 - X_{HKA}(i+h,k))^2 + (Y_2 - Y_{HKA}(i+h,k))^2 + (Z_2 - Z_{HKA}(i+h,k))^2} , \quad (6)$$

где X_2, Y_2, Z_2 – координаты фазового центра антенны приемника из состава рабочего эталона;

$X_{HKA}(i+h,k), Y_{HKA}(i+h,k), Z_{HKA}(i+h,k)$ – координаты НКА, рассчитываемые на момент времени $i+h$ комплексом адаптируемым высокоточным автоматизированных программно-аппаратных средств и публикуемые в открытом доступе на сайте информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) АО «ЦНИИмаш» (<ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/>).

Разности псевдодальностей определить по сигналам системы ГЛОНАСС для литер рабочих частот от -7 до 6 в диапазонах частот L1 и L2 по фазе дальномерного кода и на частоте L3.

10.1.8 Исключить из значений разностей псевдодальностей $\Delta S(i,k)$ значения разности шкалы времени изделия на момент времени i и шкалы времени рабочего эталона на момент времени $i+h$, рассчитанные в п. 10.1.6. Определить значения разностей псевдодальностей по формуле (7):

$$\Delta S'(i, k) = \Delta S(i, k) - \Delta T5 \quad , \quad (7)$$

где $\Delta T5$ – разность шкалы времени изделия на момент времени i и шкалы времени рабочего эталона на момент времени $i+h$ (Приложение А).

Определить разности псевдодальностей по сигналам системы ГЛОНАСС для литер рабочих частот от -7 до 6 в диапазонах частот L1 и L2 по фазе дальномерного кода и на частоте L3.

10.1.9 Определить среднее значение разности псевдодальностей по одному НКА $\Delta S'(i, k)$ на интервале наблюдений времени по формуле (8):

$$\overline{\Delta S'}(k) = \frac{1}{N} \sum_i^N \Delta S'(i, k) \quad , \quad (8)$$

где N – количество измерений.

Систематические погрешности измерений псевдодальности до навигационных космических аппаратов КНС ГЛОНАСС определить для литер от минус 7 до 6 в частотных диапазонах L1 и L2 и на частоте L3 (одно значение на любом суточном интервале для каждого НКА).

10.1.10 Результаты поверки считать положительными, если абсолютная систематическая погрешность измерений беззапросной дальности по дальномерным кодам сигналов космических аппаратов ГЛОНАСС находится в пределах $\pm 0,36$ м.

10.2 Определение среднего квадратического отклонения результата измерения беззапросной дальности на интервале времени осреднения 30 с, среднего квадратического отклонения измерения беззапросной дальности по фазе несущей навигационного сигнала на интервале времени осреднения 30 с, среднего квадратического отклонения измерения радиальной беззапросной скорости на интервале времени осреднения 30 с

10.2.1 Используя измерительную информацию, полученную с изделия в п. 10.1.2 или п. 10.1.6 на любом часовом интервале времени для каждого принятого сигнала НКА КНС ГЛОНАСС определить среднее квадратическое отклонение (СКО) результата измерения беззапросной дальности на интервале времени осреднения 30 с по формуле (9) (например для сигнала L1OF k-ой литеры НКА ГЛОНАСС):

$$\sigma_S = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (P_{СБИС}(i, k) - \bar{P}_{СБИС}(k))^2} \quad , \quad (9)$$

$$\text{где } P_{СБИС}(i, k) = S_{СБИС}^{OFL1}(i, k) - L1_{СБИС}^{OFL1}(i, k) - 2 \cdot (L1_{СБИС}^{OFL1}(i, k) - L2_{СБИС}^{OFL1}(i, k)) \cdot \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$$

$$\bar{P}_{СБИС}(k) = \sum_{i=1}^N \frac{P_{СБИС}(i, k)}{N}$$

$L1, L2$ – значения псевдодальностей, измеренные поверяемым изделием по фазе несущей частоты навигационного сигнала НКА ГЛОНАСС на частотах L1 и L2 соответственно в i -ый момент времени, м;

f_1, f_2 – значения несущей частоты сигнала НКА в L1 и L2 диапазонах, м.

N – количество измерений.

10.2.2 Используя измерительную информацию, полученную с изделия в п. 10.1.2 или п. 10.1.6 на любом часовом интервале времени для каждого принятого сигнала НКА КНС ГЛОНАСС определить СКО результата измерения беззапросной дальности по фазе несущей навигационного сигнала на интервале осреднения 30 с по формуле (10):

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (L_{СБИС}(i,k) - \bar{L}_{СБИС}(k))^2}, \quad (10)$$

где $L_{СБИС}(i,k) = \frac{1}{8 \cdot \Delta T^2} \cdot (\Delta \Delta L_{i,k} - \Delta \Delta L_{i+\Delta T,k})$

$$\bar{L}_{СБИС}(k) = \sum_{i=1}^N \frac{L_{СБИС}(i,k)}{N}$$

L_1, L_2 - значения псевдодальностей, измеренные поверяемым изделием по фазе несущей частоты навигационного сигнала НКА ГЛОНАСС на частотах L1 и L2 соответственно в i-ый момент времени, м;

$$\Delta L_{i,k} = L_1_{i,k} - L_2_{i,k}, \Delta L_{i+\Delta T,k} = L_1_{i+\Delta T,k} - L_2_{i+\Delta T,k};$$

$$\Delta \Delta L_{i,k} = \Delta L_{i,k} - \Delta L_{i+\Delta T,k}, \Delta \Delta L_{i+\Delta T,k} = \Delta L_{i+2 \cdot \Delta T,k} - \Delta L_{i+3 \cdot \Delta T,k}$$

N – количество измерений;

ΔT – дискретность записи значений псевдодальностей, измеренных поверяемым изделием по фазе несущей частоты в файле RINEX, с.

10.2.3 Выполнить действия п. 10.2.2 для комбинации (L1-L3) для НКА ГЛОНАСС с сигналом на частоте L3.

10.2.4 Используя измерительную информацию, полученную с изделия в п. 10.1.2 или п. 10.1.6 на любом часовом интервале времени для каждого принятого сигнала НКА КНС ГЛОНАСС определить СКО результата измерения радиальной беззапросной скорости на интервале времени осреднения 30 с по формуле (11):

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{4(N-1)} \sum_{i=1}^N (\Delta V_{СБИС}(i,k) - \bar{V}_{СБИС}(k))^2}, \quad (11)$$

где $\Delta V_{СБИС}(i,k) = (V_{СБИСL2}(i+1,k) - V_{СБИСL2}(i,k)) - (V_{СБИСL1}(i+1,k) - V_{СБИСL1}(i,k));$

$$\bar{V}_{СБИС}(k) = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta V_{СБИС}(i,k)}{N}.$$

$V_{СБИС}$ – значение радиальной беззапросной скорости, измеренное поверяемым изделием (выражено в метрах в секунду);

N – количество измерений.

10.2.5 Выполнить действия п. 10.2.4 для комбинации несущих частот L1-L3.

10.2.6 Результаты поверки считать положительными, если среднее квадратическое отклонение измерения беззапросной дальности на интервале времени осреднения 30 с не превышает предела:

- по дальномерным кодам сигналов КА ГЛОНАСС L1SC, L2SC, L3OC: 0,07 м;
- по дальномерным кодам сигналов КА ГЛОНАСС L1OC, L2OC, L1OF, L2OF: 0,14 м;
- по фазе несущей навигационного сигнала: 0,0009 м;
- радиальной беззапросной скорости 0,004 м/с.

10.3 Определение погрешности синхронизации формируемой шкалы времени изделия со шкалой времени системы ГЛОНАСС

В случае доставки эталона к месту эксплуатации изделия или в случае доставки изделия к месту эксплуатации эталона

10.3.1 Определение погрешности синхронизации формируемой шкалы времени изделия со шкалой времени системы ГЛОНАСС провести с применением перевозимого комплекта аппаратуры для высокоточного сравнения шкал времени GTR51 из состава ГЭТ 1-2022 по схеме, приведенной на рисунке 3 (подачу сигнала 1 Гц от аппаратуры

формирования шкалы времени УЭ2.084.048 на вход GTR51 обеспечивает Заказчик поверки изделия). Рекомендуется выполнять этот пункт поверки одновременно с пунктом 10.1, что позволит избежать повторного сбора и обработки измерений изделия.

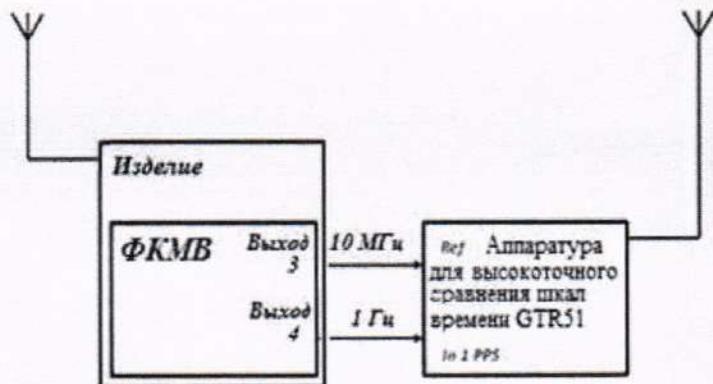


Рисунок 3 – Схема определения погрешности синхронизации формируемой шкалы времени изделия со шкалой времени системы ГЛОНАСС

10.3.2 В соответствии с требованиями ЭД включить средства поверки, изделие и вспомогательное оборудование, перевести поверяемое изделие в режим 3 «Проведение поверки БИК СБИС-А», убедиться, что файлы формата RINEX аппаратурой для высокоточного сравнения шкал времени GTR51 из состава ГЭТ 1-2022 формируются.

10.3.3 Провести накопление результатов измерений на интервале времени наблюдений не менее 11 полных суток.

10.3.4 С применением специального программного обеспечения (СПО) из состава ГЭТ 1-2022 обработать файлы формата RINEX полученные с применением GTR51, рассчитать среднесуточные значения разности шкалы времени GTR51 со шкалой времени системы ГЛОНАСС полученные по безионосферной комбинации сигналов L3P $\Delta T_{[T(\text{Изд})-\text{T(ГЛОНАСС)}]_i}$.

10.3.5 Значения погрешности синхронизации формируемой шкалы времени изделия со шкалой времени системы ГЛОНАСС на интервале времени наблюдений 11 сут рассчитать по формуле (12), результаты расчётов занести в таблицу 5:

$$\Delta_i = \Delta T_{[T(\text{Изд})-\text{T(ГЛОНАСС)}]_i} + t_{\text{каб}} , \quad (12)$$

где $t_{\text{каб}}$ – задержка прохождения сигнала 1 Гц в подключаемом кабеле от выхода 4 изделия к входу «In 1 PPS» GTR51.

Таблица 5.

№ п/п	Дата наблюдений	$\Delta T_{[T(\text{Изд})-\text{T(ГЛОНАСС)}]_i}$, нс	$t_{\text{каб}}$, нс	Погрешность синхронизации формируемой шкалы времени изделия со шкалой времени системы ГЛОНАСС Δ_i , нс
1				
2				
...				
11				

10.3.6 Погрешность синхронизации формируемой шкалы времени изделия со шкалой времени системы ГЛОНАСС определить как максимальное из полученных значений на интервале времени наблюдений.

В случае размещения изделия и эталона на местах их эксплуатации

10.3.7 Определение погрешности синхронизации формируемой шкалы времени изделия со шкалой времени системы ГЛОНАСС провести дифференциальным методом с применением аппаратуры для высокоточного сравнения шкал времени GTR51 из состава ГЭТ 1-2022 по схеме, приведенной на рисунке 4. Рекомендуется выполнять этот пункт поверки одновременно с пунктом 10.1, что позволит избежать повторного сбора и обработки измерений БИК СБИС-А.

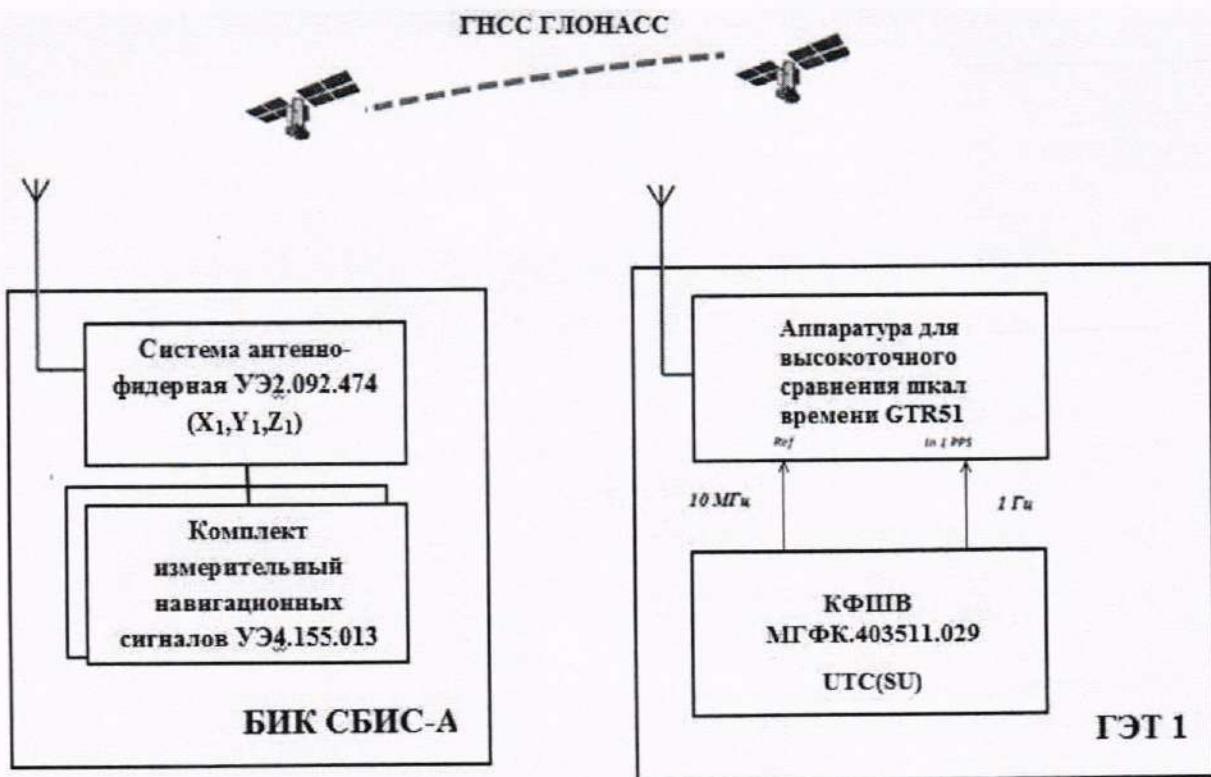


Рисунок 4 – Схема определения погрешности синхронизации формируемой шкалы времени изделия со шкалой времени системы ГЛОНАСС

10.3.8 В соответствии с требованиями ЭД включить средства поверки, изделие и вспомогательное оборудование, перевести поверяемое изделие в режим 3 «Проведение поверки БИК СБИС-А», убедиться, что файлы формата RINEX поверяемым изделием и аппаратурой для высокоточного сравнения шкал времени GTR51 из состава ГЭТ 1-2022 формируются.

10.3.9 Провести накопление результатов измерений на интервале времени наблюдений не менее 11 полных суток.

10.3.10 По результатам измерений получить суточные файлы формата RINEX, содержащие результаты измерений псевдодальности по сигналам с открытым доступом (OF – open frequency, OC – open codes) НКА системы ГЛОНАСС (L1, L2, L3) (файлы измерений БИК СБИС-А в формате RINEX предоставляет Заказчик поверки средства измерений).

Последовательно обработать каждый суточный файл для оценки положения шкалы времени поверяемого средства измерений и GTR51 из состава ГЭТ 1-2022 методом Precise Point Positioning PPP (по формулам Приложения А, п. А.2-А.3).

10.3.11 По результатам обработки PPP рассчитать разность шкал времени поверяемого средства измерений и ШВ ГЭТ 1-2022 по формуле (13):

$$\Delta \tilde{T} = \Delta T_{[T(\text{Изд})]_i} - \Delta T_{[T(\text{ГЭТ1})]_i} , \quad (13)$$

где:

- $\Delta T_{[T(\text{Изд})]_i}$ - Оценка положения шкалы времени поверяемого средства, полученная в пункте 10.3.10.
- $\Delta T_{[T(\text{ГЭТ1})]_i}$ - Оценка положения шкалы времени GTR51 из состава ГЭТ 1-2022, полученная в пункте 10.3.10.

10.3.12 На каждый момент времени рассчитать по формуле (14) разность шкалы времени поверяемого средства измерений и шкалы времени системы ГЛОНАСС, используя данные о расхождении шкалы времени ГЭТ 1-2022 и шкалы времени системы ГЛОНАСС, публикуемые в официальном бюллетене «Z» ГМЦ ГСВЧ:

$$\Delta T_i = \Delta \tilde{T} - \Delta T_{[\text{ШВ ГЛОНАСС-ГЭТ1}]_i} , \quad (14)$$

где $\Delta T_{[\text{ШВ ГЛОНАСС-ГЭТ1}]_i}$ - данные из Бюллетеня «Z».

10.3.13 Погрешность синхронизации формируемой шкалы времени изделия со шкалой времени системы ГЛОНАСС определить как максимальное из полученных значений по формуле (16) на интервале времени наблюдений.

10.3.14 Результаты поверки считать положительными, если максимальное значение погрешности синхронизации формируемой шкалы времени изделия со шкалой времени системы ГЛОНАСС находится в пределах ± 250 нс.

10.4 Определение относительной погрешности по частоте формируемых сигналов

10.4.1 Для определения относительной погрешности по частоте формируемых сигналов на интервале времени наблюдений не менее 11 полных суток провести накопление результатов измерений с применением поверяемого изделия и стационарного комплекта аппаратуры для высокоточного сравнения шкал времени GTR51 из состава ГЭТ 1-2022 (при первичной поверке), блока приемно-вычислительного УЭ3.032.246 (при периодической поверке). Накопление результатов измерений рекомендуется совмещать с выполнением операций поверки по п. 10.3.7.

10.4.2 С применением СПО из состава ГЭТ 1-2022 обработать файлы формата RINEX, полученные с применением ГЭТ 1-2022 и поверяемого изделия, рассчитать среднесуточные значения разности шкалы времени поверяемого изделия с национальной шкалой времени UTC(SU).

10.4.3 Рассчитать по формуле (15) среднесуточные значения разности шкалы времени изделия с национальной шкалой времени UTC(SU), результаты расчётов занести в таблицу 6.

$$\Delta T_{[UTC(SU)-T(\text{Изд})]_i} = \Delta T_{[UTC(SU)-T(\text{ГЛОНАСС})]_i} - \Delta T_{[T(\text{Изд})-T(\text{ГЛОНАСС})]_i} , \quad (15)$$

10.4.4 Фазово-временным методом, рассчитать по формуле (16) среднесуточные значения относительной погрешности по частоте формируемых сигналов, результаты расчётов занести в таблицу 6.

$$\Delta_o f_j = \frac{\Delta T_{[UTC(SU)-T(\text{Изд})]_{i+1}} - \Delta T_{[UTC(SU)-T(\text{Изд})]_i}}{86400} , \quad (16)$$

Таблица 6.

№ п/п	Дата наблюдений	Разность шкалы времени изделия с национальной шкалой времени UTC(SU) $\Delta T_{[UTC(SU)-T(Изд)]_i}$, с	Относительная погрешность по частоте $\Delta_0 f_j$
1			
2			
...			
11			

10.4.5 Относительную погрешность по частоте формируемых сигналов определить как максимальное из полученных значений на интервале времени наблюдений.

10.4.6 Результаты поверки считать положительными, если максимальное значение относительной погрешности по частоте формируемых сигналов находится в пределах $\pm 1,0 \cdot 10^{-13}$.

10.5 Определение нестабильности (СКДО) частоты формируемых сигналов при интервале времени измерения 1 сутки

10.5.1 Определение нестабильность (СКДО) частоты формируемых сигналов при интервалах времени измерения 1 сутки определяется по данным, приведенным в таблице 5.

10.5.2 Накопление результатов измерений рекомендуется совмещать с выполнением операций поверки по п. 10.4.1. При этом должна быть обеспечена непрерывность результатов измерений в течение интервала времени наблюдений 10 суток.

10.5.3 Рассчитать значение нестабильности частоты формируемых сигналов при интервалах времени измерения 1 сутки по формуле (17):

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(n-1)} \sum_{j=1}^{n-1} [\Delta_0 f_{(j+1)} - \Delta_0 f_j]^2}, \quad (17)$$

где $\Delta_0 f_j$ – относительная погрешность по частоте формируемых сигналов (данные из столбца 4 таблицы 6).

10.5.4 Результаты поверки считать положительными, если значение нестабильности (СКДО) частоты формируемых сигналов при интервале времени измерения 1 сутки не более $4 \cdot 10^{-15}$.

10.6 Определение абсолютной погрешности (при доверительной вероятности 0,95) измерения температуры в диапазоне от -50 до +60 °C

10.6.1 Установить составные части изделия - монтажи метеостанций УЭ4.077.321 (далее - метеостанции) и эталонный термометр в климатической камере.

10.6.2 Провести подготовку метеостанций к работе согласно руководству по их эксплуатации.

10.6.3 Установить значение температуры в климатической камере 0 °C. Температура внутри климатической камеры контролируется эталонным термометром. Выдержать метеостанции при установленной температуре не менее 2 часов.

10.6.4 Через 2 часа после установления заданной температуры, записать 10 результатов измерений температуры метеостанцией ($T_{изм}$) и 10 результатов измерений температуры эталонным термометром ($T_{этм}$).

10.6.5 Установить поочередно следующие значения температур в климатической камере: -10°C , -30°C , -40°C , -50°C . Выдержать метеостанции при каждой установленной температуре не менее 2 часов, записать результаты измерений.

10.6.6 Установить значение температуры в климатической камере 0°C . Выдержать метеостанции при установленной температуре не менее 8 часов.

10.6.7 Установить поочередно следующие значения температур в климатической камере: $+10^{\circ}\text{C}$, $+30^{\circ}\text{C}$, $+40^{\circ}\text{C}$, $+50^{\circ}\text{C}$, $+60^{\circ}\text{C}$. Выдержать метеостанции при каждой установленной температуре не менее 2 часов, записать результаты измерений.

10.6.8 Рассчитать абсолютную погрешность измерений температуры (ΔT), для каждого i -го измерения, как разность между измеренным значением температуры метеостанцией ($T_{измi}$) и термометром ПТСВ-2к-2 ($T_{эмi}$), по формуле (18):

$$\Delta T_i = T_{измi} - T_{эмi} \quad , \quad (18)$$

10.6.9 Рассчитать систематическую погрешность измерений температуры по формуле (19):

$$\delta_T = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \Delta T_i \quad , \quad (19)$$

где N – число измерений.

10.6.10 Рассчитать СКО результата измерений температуры по формуле (20):

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta T_i - \delta_T)^2}{N-1}} \quad , \quad (20)$$

10.6.11 Рассчитать абсолютную погрешность (при доверительной вероятности 0,95) измерений температуры по формуле (21):

$$P_T = \pm(|\delta_T| + 2\sigma_T) \quad , \quad (21)$$

10.6.12 Результаты поверки считать положительными, если определенные значения доверительных границ абсолютной погрешности (при доверительной вероятности 0,95) измерения температуры в диапазоне от -50 до $+60^{\circ}\text{C}$ не превышают $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

10.7 Определение абсолютной погрешности (при доверительной вероятности 0,95) измерения относительной влажности в диапазоне от 0 до 100%

10.7.1 Установить метеостанции в генератор влажного воздуха.

10.7.2 Провести подготовку метеостанций к работе согласно руководству по эксплуатации.

10.7.3 Установить следующее значение влажности в генераторе 0%. Выдержать метеостанции при установленной влажности не менее 2 часов.

10.7.4 Влажность внутри генератора контролируется эталоном. Через 2 часа после установления контрольной влажности, записать 10 результатов измерений влажности метеостанцией ($H_{измi}$) и 10 результатов измерений влажности эталоном ($H_{эмi}$).

10.7.5 Установить поочередно следующие значения влажностей в генераторе: 30%, 60%, 80%, 100%. Выдержать метеостанции при каждой установленной влажности не менее 2 часов, записать результаты измерений.

10.7.6 Рассчитать абсолютную погрешность измерения относительной влажности (ΔH), для каждого i-го номера контроля как разность между измеренным значением метеостанцией ($H_{измi}$) и эталонным значением ($H_{эмi}$), по формуле (22):

$$\Delta H_i = H_{измi} - H_{эмi} \quad , \quad (22)$$

10.7.7 Рассчитать систематическую погрешность измерений влажности по формуле (23):

$$\delta_H = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \Delta H_i \quad , \quad (23)$$

где N – число измерений.

10.7.8 Рассчитать СКО результата измерений влажности по формуле (24):

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta H_i - \delta_H)^2}{N-1}} \quad , \quad (24)$$

10.7.9 Рассчитать абсолютную погрешность (при доверительной вероятности 0,95) измерений влажности по формуле (25):

$$P_H = \pm(\delta_H + 2\sigma_H) \quad , \quad (25)$$

10.7.10 Результаты поверки считать положительными, если определенные значения доверительных границ допускаемой абсолютной погрешности (при доверительной вероятности 0,95) измерения относительной влажности в диапазоне от 0 до 100% не превышают $\pm 5\%$.

10.8 Определение абсолютной погрешности (при доверительной вероятности 0,95) измерения атмосферного давления в диапазоне от 600 до 1100 гПа

10.8.1 Установить метеостанции в барокамере.

10.8.2 Провести подготовку метеостанций к работе согласно руководству по их эксплуатации.

10.8.3 Метеостанции и эталонный барометр расположить в барокамере установив следующее значения давления – 600 гПа.

10.8.4 Давление контролируется эталонным барометром. Через 10 минут после установления контрольного давления, записать 10 результатов измерений давления метеостанцией ($P_{измi}$) и 10 результатов измерений давления эталоном ($P_{эмi}$).

10.8.5 В барокамере поочередно установить следующие значения давлений: 700 гПа, 800 гПа, 900 гПа 1000 гПа, 1100 гПа. Выдержать метеостанции при каждой установленном давлении не менее 10 минут, записать результаты измерений.

10.8.6 Рассчитать абсолютную погрешность измерений давления (ΔP), для каждого i -го измерения, как разность между измеренным значением давления метеостанцией ($P_{измi}$) и барометром PTB330 ($P_{эмi}$), по формуле (26):

$$\Delta P_i = P_{измi} - P_{эмi} \quad , \quad (26)$$

10.8.7 Рассчитать систематическую погрешность измерений давления по формуле (27):

$$\delta_p = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \Delta P_i \quad , \quad (27)$$

где N – число измерений.

10.8.8 Рассчитать СКО результата измерений давления по формуле (28):

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta P_i - \delta_p)^2}{N-1}} \quad , \quad (28)$$

10.8.9 Рассчитать абсолютную погрешность (при доверительной вероятности 0,95) измерений давления по формуле (29):

$$P_p = \pm(|\delta_p| + 2\sigma_p) \quad , \quad (29)$$

10.8.10 Результаты испытаний считать положительными, если определенные значения доверительных границ допускаемой абсолютной погрешности (при доверительной вероятности 0,95) измерения атмосферного давления в диапазоне от 600 до 1100 гПа не превышают $\pm 0,1$ гПа.

11 Оформление результатов поверки

11.1 Сведения о результатах поверки изделий передаются в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений в соответствии с порядком создания и ведения Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений, передачи сведений в него и внесения изменений в данные сведения, предоставления содержащихся в нем документов и сведений, предусмотренным частью 3 статьи 20 Федерального закона № 102-ФЗ.

11.2 По заявлению владельца изделий или лица, представившего их на поверку, положительные результаты поверки оформляют записью в паспорте, удостоверенной подписью поверителя и нанесением знака поверки или выдают свидетельство о поверке по установленной форме, соответствующей действующему законодательству.

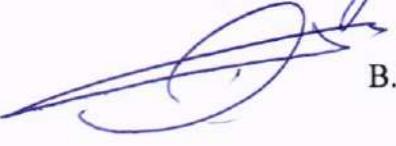
11.3 По заявлению владельца изделий или лица, представившего их на поверку, в случае отрицательных результатов поверки, выдается извещение о непригодности к применению средства измерений.

Начальник отделения НИО-8 ФГУП «ВНИИФТРИ»



А.М. Каверин

Начальник НИО-6 ФГУП «ВНИИФТРИ»



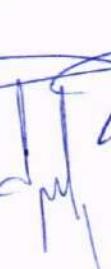
В.И. Добровольский

Начальник отдела № 71 – ученый хранитель
ГЭТ 1-2022 ФГУП «ВНИИФТРИ»



И.Б. Норец

Начальник отдела 850 ФГУП «ВНИИФТРИ»



А.А. Фролов

Приложение А

A.1 Рассчитать координаты и положение шкалы времени, значений тропосферной зенитной задержки сигнала, фазовой неоднозначности в пунктах изделия и рабочего эталона на интервале времени проведения наблюдений $[t_1, t_N]$, для этого:

A.1.1 Рассчитать по формуле (A.1) безионосферные комбинации псевдодальностей до НКА КНС $S_{ionfree}(t_i)$ и по формуле (A.2) фазу несущей сигнала $\Phi_{ionfree}(t_i)$ на момент t_i :

$$S_{ionfree}(t_i) = \frac{f_{L1}^2 S_{L1}(t_i) - f_{L2}^2 S_{L2}(t_i)}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2}, \quad (A.1)$$

$$\Phi_{ionfree}(t_i) = \frac{f_{L1}^2 \Phi_{L1}(t_i) \lambda_{L1} - f_{L2}^2 \Phi_{L2}(t_i) \lambda_{L2}}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2}, \quad (A.2)$$

где f_{L1}, f_{L2} – частоты навигационного сигнала в поддиапазоне L1 и L2 соответственно, Гц,

$S_{L1}(t_i), S_{L2}(t_i)$ – псевдодальность до НКА на момент t_i в поддиапазоне L1 и L2 соответственно, м,

$\Phi_{L1}(t_i), \Phi_{L2}(t_i)$ – фаза несущей сигнала на момент t_i в поддиапазоне L1 и L2 соответственно;

$\lambda_{L1}, \lambda_{L2}$ – длины волн сигналов в поддиапазоне L1 и L2 соответственно, м.

A.1.2 Рассчитать момент времени излучения навигационного сигнала с антенны k -го НКА по формуле (A.3):

$$t_b = t_i - \frac{S_{ionfree}}{c}, \quad (A.3)$$

где t_b – момент времени излучения навигационного сигнала с НКА, с,

t_i – момент времени приема навигационного сигнала приемником, с,

c – скорость света, 299792458 м/с.

A.1.3 Определить координаты $(x^k(t_b), y^k(t_b), z^k(t_b))$ k -го НКА по данным файла эфемеридной информации в формате sp3, формируемой СКПХ.

A.1.4 Рассчитать геометрическую дальность k -го до НКА $R_n^k(t_i)$ по формуле (A.4):

$$R_n^k(t_i) = \sqrt{(x^k(t_b) - x_n)^2 + (y^k(t_b) - y_n)^2 + (z^k(t_b) - z_n)^2}, \quad (A.4)$$

где $(x^k(t_b), y^k(t_b), z^k(t_b))$ – координаты k -го НКА в момент времени излучения навигационного сигнала t_b , рассчитываемые из файла эфемеридной информации в формате sp3, м,

(x_n, y_n, z_n) – координаты пункта размещения приемника из заголовка файла наблюдений в формате RINEX, м.

A.1.5 Определить смещение бортовой шкалы времени k -го НКА $\Delta T2(k)$ относительно системной шкалы на момент времени излучения сигнала по данным файла с частотно-временными поправками в формате clk, формируемые системой СКПХ.

A.1.6 Рассчитать гравитационную поправку по формуле (A.5):

$$Grav = \frac{2GM}{c^2} \times \ln \left(\frac{\|r^k(t_b)\| + \|r_n\| + R_n^k(t_i)}{\|r^k(t_b)\| + \|r_n\| - R_n^k(t_i)} \right), \quad (A.5)$$

где GM – константа гравитационного поля Земли, $398600,4418 \text{ км}^3/\text{с}^2$,

$\|r^k(t_b)\| = \sqrt{(x^k(t_b))^2 + (y^k(t_b))^2 + (z^k(t_b))^2}$ – расстояние между k -ым НКА и центром Земли на момент излучения навигационного сигнала (t_b) , м,

$$\|r_n\| = \sqrt{x_n^2 + y_n^2 + z_n^2} \text{ – расстояние между приемником и центром Земли, м.}$$

A.1.7 Рассчитать релятивистскую поправку по формуле (A.6):

$$Rel = -\frac{2\mathbf{r}^k(t_b)\mathbf{V}^k(t_b)}{c}, \quad (\text{A.6})$$

где $\mathbf{r}^k(t_b) = [x^k(t_b), y^k(t_b), z^k(t_b)]$ – вектор координат k -го НКА в момент излучения сигнала t_b , рассчитанный по данным файла sp3, м,

$\mathbf{V}^k(t_b) = [\dot{x}^k(t_b), \dot{y}^k(t_b), \dot{z}^k(t_b)]$ – вектор скорости k -го НКА в момент излучения сигнала t_b , рассчитанный по данным файла sp3, м/с.

A.1.8 Рассчитать ориентацию k -го НКА относительно Солнца:

- $\rho_{Sun}^k(t_b) = \sqrt{(x^k(t_b) - x_{Sun})^2 + (y^k(t_b) - y_{Sun})^2 + (z^k(t_b) - z_{Sun})^2}$ – вектор между положением Солнца $(x_{Sun}, y_{Sun}, z_{Sun})$ и центром масс k -го НКА,

- ось Z k -го НКА относительно центра Земли $\mathbf{Z}^k = \frac{-\mathbf{r}^k(t_b)}{\|\mathbf{r}^k(t_b)\|}$

- направление k -го НКА относительно Солнца $\mathbf{D}^k = \frac{\mathbf{r}_{Sun}^k(t_b)}{\|\rho_{Sun}^k(t_b)\|}$

- ось Y k -го НКА вдоль оси солнечных панелей $\mathbf{Y}^k = \frac{\mathbf{Y}^{k'}}{\|\mathbf{Y}^{k'}\|}$, где:

$$\mathbf{Y}^{k'} = [\mathbf{D}_2^k \mathbf{Z}_3^k - \mathbf{D}_3^k \mathbf{Z}_2^k, \mathbf{D}_3^k \mathbf{Z}_1^k - \mathbf{D}_1^k \mathbf{Z}_3^k, \mathbf{D}_1^k \mathbf{Z}_2^k - \mathbf{D}_2^k \mathbf{Z}_1^k],$$

$$\|\mathbf{Y}^{k'}\| = \sqrt{(\mathbf{D}_2^k \mathbf{Z}_3^k - \mathbf{D}_3^k \mathbf{Z}_2^k)^2 + (\mathbf{D}_3^k \mathbf{Z}_1^k - \mathbf{D}_1^k \mathbf{Z}_3^k)^2 + (\mathbf{D}_1^k \mathbf{Z}_2^k - \mathbf{D}_2^k \mathbf{Z}_1^k)^2};$$

- ось X k -го НКА, указывающая на полуплоскость между Солнцем и панелями НКА

$$\mathbf{X}^k = \frac{\mathbf{X}^{k'}}{\|\mathbf{X}^{k'}\|}, \text{ где: } \mathbf{X}^{k'} = [\mathbf{Y}_2^k \mathbf{Z}_3^k - \mathbf{Y}_3^k \mathbf{Z}_2^k, \mathbf{Y}_3^k \mathbf{Z}_1^k - \mathbf{Y}_1^k \mathbf{Z}_3^k, \mathbf{Y}_1^k \mathbf{Z}_2^k - \mathbf{Y}_2^k \mathbf{Z}_1^k],$$

$$\|\mathbf{X}^{k'}\| = \sqrt{(\mathbf{Y}_2^k \mathbf{Z}_3^k - \mathbf{Y}_3^k \mathbf{Z}_2^k)^2 + (\mathbf{Y}_3^k \mathbf{Z}_1^k - \mathbf{Y}_1^k \mathbf{Z}_3^k)^2 + (\mathbf{Y}_1^k \mathbf{Z}_2^k - \mathbf{Y}_2^k \mathbf{Z}_1^k)^2}.$$

Рассчитать поправки на wind-up эффект по формуле (A.7):

$$d_{wind-up}(t_b) = 2N \cdot \pi + sign(\mathbf{a}_n^k \cdot (\mathbf{d}^k \cdot \mathbf{d}_n)) \arccos \left(\frac{\mathbf{d}^k \cdot \mathbf{d}_n}{\|\mathbf{d}^k\| \cdot \|\mathbf{d}_n\|} \right), \quad (\text{A.7})$$

где N – целое число циклов,

$\mathbf{a}_n^k = \frac{\mathbf{r}_n - \mathbf{r}^k(t_b)}{R_n^k(t_i)}$ – вектор направления от k -го НКА к приемнику,

$\mathbf{r}_n = [x_n, y_n, z_n]$ – вектор координат приемника в момент приема сигнала t_i , приведенные в заголовке файла наблюдений,

$\mathbf{d}^k = \mathbf{X}^k - \mathbf{a}_n^k \cdot (\mathbf{a}_n^k \times \mathbf{X}^k) + \mathbf{a}_n^k \times \mathbf{Y}^k$ – вектор ориентации k -го НКА, вычисленный по координатам $(\mathbf{X}^k, \mathbf{Y}^k, \mathbf{Z}^k)$,

$\mathbf{X}^k, \mathbf{Y}^k$ – ортогональные векторы, указывающие на восток и север соответственно,
 $\mathbf{d}_n = \mathbf{X}_n - \mathbf{a}_n^k \cdot (\mathbf{a}_n^k \times \mathbf{X}_n) + \mathbf{a}_n^k \times \mathbf{Y}_n$ – вектор ориентации приемника, вычисленный по координатам $(\mathbf{X}_n, \mathbf{Y}_n, \mathbf{Z}_n)$.

A.2 Рассчитать наклонную тропосферную поправку на момент времени t_i .

A.2.1 Для расчета использовать эмпирическую модель GPT2, которая позволяет определять давление, температуру, перепад температур, давление водяного пара, коэффициенты гидростатической и влажной функций отображения, а также неравномерность геоида в пункте размещения приемника. Входными параметрами GPT2 являются координаты антенны и день года для моделирования перечисленных параметров, опираясь на глобальную карту средних значений параметров тропосферы с шагом в 5 градусов (файл gpt2_5.grd). Модель и используемые данные рекомендованы к использованию соглашением Международной службы вращения Земли IERS 2010 года, Petit G., Luzum B. IERS Conventions (2010): tech. rep. URL: https://webtai.bipm.org/iers/convupdt/convupdt_c9.html:

$$P, Temp, dTemp, e_p, a_h, a_w, u = GPT2(MJD, B, L, H), \quad (A.8)$$

где P – давление, Па,

$Temp$ – температура, $^{\circ}\text{C}$,

$dTemp$ – изменение температуры, $^{\circ}\text{C} / \text{км}$,

e_p – давление водяного пара, Па,

a_h – коэффициент гидростатической функции отображения,

a_w – коэффициент влажной функции отображения,

u – неравномерность геоида в пункте размещения приемника, м,

MJD – дата проведения измерений в формате модифицированной Юлианской даты,

B, L – геодезическая широта и долгота соответственно, рад,

H – геодезическая высота, м.

Коэффициенты a_h, a_w являются входными данными для вычисления функций отображения (модель VMF1):

$$m_h(e), m_w(e) = VMF1(a_h, a_w, MJD, B, L, H, e), \quad (A.9)$$

где $m_h(e)$ – гидростатическая отображающая функция,

$m_w(e)$ – влажная отображающая функция,

e – угол возвышения НКА, рад.

Оценить гидростатическую (A.10) и влажную (A.11) зенитные тропосферные задержки:

$$d_{hz} = 0,0022768 \times \frac{P}{1 - 0,00268 \cdot \cos(2B) - 0,00000028H}, \quad (A.10)$$

$$d_{wz_m} = 0,0022768 \times \left(\frac{1255}{Temp + 273.15} + 0.05 \right) \times \frac{e_p}{1 - 0,00268 \cdot \cos(2B) - 0,00000028H}, \quad (A.11)$$

где d_{hz} – зенитная гидростатическая тропосферная поправка, м,

d_{wz_m} – моделируемая составляющая зенитной влажной тропосферной поправки, м.

Значение тропосферной поправки $\Delta T4(t_i)$ рассчитать по формуле (A.12):

$$\Delta T4(t_i) = d_{hz} \cdot m_h(e) + d_{wz_m} \cdot m_w(e). \quad (A.12)$$

A.2.2 Решение линейной модели наблюдения $\mathbf{Y} = \mathbf{GX}$ с помощью фильтра Калмана для K видимых НКА в пункте размещения приемника на момент времени t_i :

- вектор невязок

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} S_{ionfree}^1 - R_n^1 + c\Delta T^1 - Trop_n^1 - Grav^1 - Rel^1 \\ \Phi_{ionfree}^1 - R_n^1 + c\Delta T^1 - Trop_n^1 - Grav^1 - Rel^1 - d_{wind-up}^1 - (\lambda\omega)^1 \\ \vdots \\ S_{ionfree}^K - R_n^K + c\Delta T^K - Trop_n^K - Grav^K - Rel^K \\ \Phi_{ionfree}^K - R_n^K + c\Delta T^K - Trop_n^K - Grav^K - Rel^K - d_{wind-up}^K - (\lambda\omega)^K \end{bmatrix},$$

где $(\lambda\omega)^K$ - фазовая неоднозначность для K -ого НКА,

-матрица частных производных

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{x_n - x^1}{R_n^1} & \frac{y_n - y^1}{R_n^1} & \frac{z_n - z^1}{R_n^1} & 1 & m_w^1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \frac{x_n - x^1}{R_n^1} & \frac{y_n - y^1}{R_n^1} & \frac{z_n - z^1}{R_n^1} & 1 & m_w^1 & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{x_n - x^K}{R_n^K} & \frac{y_n - y^K}{R_n^K} & \frac{z_n - z^K}{R_n^K} & 1 & m_w^K & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \frac{x_n - x^K}{R_n^K} & \frac{y_n - y^K}{R_n^K} & \frac{z_n - z^K}{R_n^K} & 1 & m_w^K & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix};$$

- вектор оцениваемых параметров $\mathbf{X} = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z \quad c \cdot \Delta T_n \quad d'_{wz} \quad b^1 \quad \dots \quad b^K]^T$,

где $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – смещение координат антennы приемника относительно приведенных в заголовке файла наблюдений на момент времени t_i , м,

$c \cdot \Delta T_n$ – смещение шкалы времени приемника относительно системной шкалы на момент времени t_i , м,

d'_{wz} – оцениваемая тропосферная влажная зенитная задержка на момент времени t_i , м,

b^K – оценка дробной фазовой неоднозначности для K -ого НКА на момент времени t_i , м.

A.2.3 Провести расчеты по пп. А.2 на все моменты времени $t_i \in [t_1, t_N]$ проведения наблюдений.

A.2.4 Рассчитать полную тропосферную поправку навигационных сигналов на каждый момент времени на интервале времени проведения наблюдений $[t_1, t_N]$ для всех НКА в пункте размещения приемника.

Оценить полную зенитную тропосферную поправку по формуле (A.13):

$$d_{wz} = d_{wz,m} + d'_{wz}, \quad (A.13)$$

где d_{wz} – зенитная тропосферная поправка, м,

d'_{wz} – оцененная составляющая зенитной тропосферной поправки из пп. А.2.1, м.

Значение полной тропосферной поправки рассчитать по формуле (A.12).

A.3 Рассчитать ионосферную поправку навигационных сигналов на каждый момент времени на интервале времени проведения наблюдений $[t_1, t_N]$ для всех НКА в пункте размещения приемника

Рассчитать функцию отображения $m_{ion}(e)$ для ионосферной поправки по формуле (A.14):

$$m_{ion}(e) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{r_n^2 \cos^2(e)}{(r_n + h)^2}}}, \quad (A.14)$$

где h – высота ионосферного слоя, указываемая в файле формата IONEX, м.

Определить значения вертикального общего электронного содержания ионосферы $VTEC$ на основе публикуемых Международной службой ГНСС IGS ионосферных карт в международном формате IONEX (IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1.1), <ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products/ionosphere/>.

Расчёт выполнять по математической модели по формуле (A.15):

$$\Delta T3(t_i) = \frac{40.3 \cdot VTEC}{(f^{k,m})^2} \cdot m_{ion}(e), \quad (A.15)$$

где $VTEC$ – вертикальная полная электронная концентрация,

$f^{k,m}$ – частота сигнала k -ого НКА, Гц.