

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно-исследовательский институт
физико-технических и радиотехнических измерений»

На правах рукописи

Печерица Дмитрий Станиславович

МЕТОД КАЛИБРОВКИ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ГЛОНАСС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭТАЛОНОВ,
ПРОСЛЕЖИВАЕМЫХ К ГОСУДАРСТВЕННЫМ ПЕРВИЧНЫМ
ЭТАЛОНАМ ЕДИНИЦ ВЕЛИЧИН

Специальность 05.11.15 – Метрология и метрологическое обеспечение

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Денисенко Олег Валентинович

Менделеево, 2018

Оглавление

	Стр.
Введение	5
1 Анализ методов и средств оценки инструментальной погрешности измерений псевдодальности навигационной аппаратурой потребителей системы ГЛОНАСС	14
1.1 Анализ составляющих погрешности измерений псевдодальности по сигналам ГЛОНАСС	14
1.2 Анализ требований к погрешности измерения первичных навигационных параметров	18
1.3 Анализ существующих методов калибровки НАП в части систематической погрешности измерений псевдодальности	21
1.3.1 Метод дифференциальной калибровки	22
1.3.2 Схемотехнический метод калибровки	24
1.3.3 Полунатурный метод	25
1.4 Разработка схема передачи единицы времени от первичных эталонов единиц величин к НАП при измерении задержки навигационного сигнала	27
1.5 Выводы	31
2 Метод калибровки имитатора навигационных сигналов ГЛОНАСС в части систематической погрешности формирования псевдодальности	33
2.1 Основные принципы работы имитаторов сигналов ГНСС	33
2.1.1 Описание функционирования имитаторов сигналов ГНСС	34
2.1.2 Псевдодальность, формируемая имитатором сигналов ГНСС	36
2.2 Существующие методы калибровки имитаторов сигналов ГНСС	38
2.2.1 Метод с применением «опорной НАП»	38

2.2.2	Метод с применением осциллографов	39
2.3	Разработка метода калибровки имитаторов сигналов ГЛОНАСС	45
2.3.1	Предпосылки	45
2.3.2	Описание метода калибровки имитаторов сигналов ГЛОНАСС	46
2.3.3	Технические требования для реализации метода калибровки	55
2.3.4	Бюджет неопределённости калибровки	56
2.3.5	Температурная зависимость результатов калибровки	59
2.4	Выводы	60
3	Метод калибровки навигационной аппаратуры потребителей системы ГЛОНАСС в части систематической инструментальной погрешности измерений псевдодальности	62
3.1	Основные принципы работы и описание конструкции НАП	62
3.1.1	Общее описание	62
3.1.2	Измеряемые параметры	63
3.1.3	Погрешность измерения псевдодальности и анализ существующих методов калибровки	64
3.2	Разработка метода непосредственной калибровки НАП	67
3.2.1	Описание метода	67
3.2.2	Требования к НАП	74
3.2.3	Бюджет неопределённости калибровки	75
3.3	Дифференциальный метод калибровки НАП	76
3.3.1	Описание метода	77
3.3.2	Бюджет неопределённости	81
3.3.3	Верификация метода непосредственной калибровки	83
3.4	Выводы	85
4	Исследование результатов калибровки при сличениях эталонов единиц времени и частоты и определении местоположения по сигналам ГЛОНАСС	87

4.1	Оценка стабильности результатов калибровки	87
4.2	Влияние на погрешность передачи шкалы времени.....	90
4.2.1	Метод сравнений шкал времени по сигналам ГЛОНАСС	90
4.2.2	Результаты учёта калибровочных поправок	92
4.2.3	Расчёт бюджета погрешности	95
4.3	Влияние на погрешность определения координат	98
4.3.1	Программный комплекс для моделирования решения навигационной задачи	98
4.3.2	Результаты учёта калибровочных поправок	102
4.4	Выводы	110
	Заключение	112
	Список литературы	113

Введение

В настоящее время с целью расширения внедрения отечественных спутниковых навигационных технологий и услуг с использованием системы ГЛОНАСС в интересах всех видов потребителей проводятся работы по поддержанию, развитию и использованию отечественной глобальной навигационной системы. По результатам данных работ СКО погрешности определения местоположения за счет космического сегмента ГЛОНАСС должна быть уменьшена с нынешнего значения 2,7 м до 1,4 м и достичь 1 м в 2020 году. Указанные значения с учетом среднего значения пространственного геометрического фактора, равного 2, определяют требования к составляющей эквивалентной погрешности измерений псевдодалности за счёт погрешности бортовой эфемеридно-временной информации (ЭВИ) навигационных космических аппаратов (НКА), которые составляют 0,7 м и 0,5 м соответственно. Погрешность определения времени потребителей в системной шкале времени за счет космического сегмента системы ГЛОНАСС также должна быть уменьшена до значения менее 2 нс в 2020 году.

Погрешность определения местоположения за счет космического сегмента подразумевает погрешность только за счет работы непосредственно космического комплекса системы ГЛОНАСС, включающего орбитальную группировку НКА и наземный сегмент космического комплекса (далее НС КК). Заданные требования к погрешности определения потребителем своего местоположения фактически характеризуют потенциальную точность, которую потребитель может получить при приеме сигналов системы ГЛОНАСС «идеальным» приемником, т.е. приемником, у которого отсутствуют собственные (инструментальные) погрешности измерения. При этом также предполагается отсутствие погрешностей измерений, обусловленных средой распростра-

нения навигационных сигналов (ионосферные, тропосферные погрешности, погрешности за счет эффекта многолучевости).

Псевдодальность - это дальность, измеренная беззапросным методом, т.е. разность между моментом приема фрагмента навигационного сигнала глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), отсчитанным по шкале времени приемника потребителя ГНСС, и моментом излучения его навигационным космическим аппаратом ГНСС, отсчитанным по шкале времени навигационного космического аппарата ГНСС, умноженная на значение скорости света [1]. Погрешность определения местоположения потребителя псевдодальномерным методом может быть описана выражением (1) [2, 3]:

$$\Delta(X, Y, Z) = \Delta R \cdot \Gamma\Phi, \quad (1)$$

где ΔR – погрешность измерения псевдодальности, $\Gamma\Phi$ или PDOP (Position Dilution of Precision) – пространственный геометрический фактор.

В свою очередь, погрешность измерения псевдодальности включает погрешность за счёт космического сегмента (эфемеридно-временной информации), погрешность за счёт задержки радиосигнала в атмосфере, погрешность из-за релятивистских и гравитационных эффектов, многолучёвого распространения и инструментальную погрешность измерений псевдодальности навигационной аппаратуры потребителей (НАП). Наибольший вклад в общую погрешность измерений даёт погрешность за счёт ЭВИ и инструментальная погрешность измерений НАП.

За счет задержки навигационных сигналов в тракте НАП инструментальная погрешность измерений псевдодальности может достигать единиц метров для сигналов на разных несущих частотах ГЛОНАСС и превышать десять метров для сигналов из разных частотных диапазонов.

При развитии системы ГЛОНАСС инструментальная погрешность измере-

ний псевдодальности НАП будет вносить существенный вклад в погрешность определения местоположения. Эта погрешность носит преимущественно систематический характер и может быть оценена по результатам калибровки. Необходимо обеспечить значение инструментальной погрешности измерений псевдодальности НАП, существенно меньшее по сравнению с погрешностью измерений за счет бортовой ЭВИ (минимум в 3 раза меньше). Таким образом, инструментальная погрешность измерений псевдодальности НАП не должна превышать 0,2 м.

К эталонам единиц величин, наиболее близким к измерению задержки навигационного сигнала как интервала времени, могут быть отнесены Государственный первичный эталон единиц времени и частоты ГЭТ 1-2012, Государственный первичный эталон единицы угла фазового сдвига между двумя электрическими сигналами в диапазоне частот от 0,1 МГц до 65 ГГц ГЭТ 207-2013, специальный комплект аппаратуры для обеспечения единства измерений характеристик НАП ГЛОНАСС и GPS. В то же время технические и функциональные характеристики указанных эталонов при их непосредственном использовании не обеспечивают калибровку НАП с требуемой точностью измерений.

Таким образом, возникает противоречие между требованиями к инструментальной погрешности измерения текущих навигационных параметров (псевдодальности) НАП и возможностями существующих эталонов единиц величин, что в целом приводит к невозможности достижения потребителем потенциальной точности определения местоположения (времени) при приеме сигналов ГЛОНАСС. Поэтому актуальной является **научная задача**, заключающаяся в разработке и исследовании методов и средств измерений для определения инструментальной погрешности измерения текущих навигационных параметров НАП.

Предпосылками для решения возникшего противоречия являются современный уровень развития техники в области цифрового формирования и при-

ема сигналов, а именно возможность цифрового синтеза навигационного сигнала современными генераторами (имитаторами) сигналов, возможность приема навигационного сигнала на основе использования аналого-цифрового преобразования с использованием аналого-цифровых преобразователей высокой производительности, в также высокая точность измерения текущих навигационных параметров НАП на основе использования измерений по фазе несущей навигационного сигнала (фазовых измерений).

Методы и средства измерений для определения инструментальной погрешности измерения и погрешностей измерений текущих навигационных параметров НАП в целом рассматривались в работах О.В. Денисенко, В.В. Дворкина, С.Н. Карутина, Ю.С. Яскина, В.Н. Федотова, И.О. Скакуна. Однако в проведенных исследованиях анализу подвергалась в основном случайная составляющая погрешности измерения, требования к инструментальной погрешности измерения НАП существенно превышали значения, рассматриваемые в данной диссертационной работе. Вопросы прослеживаемости эталонов для калибровки НАП в целом и результатов их измерений к государственным первичным эталонам единиц величин не рассматривались.

Целью работы является уменьшение погрешности измерения текущих навигационных параметров, вносимой НАП системы ГЛОНАСС.

Для достижения цели поставлены и решены следующие **частные научные задачи**:

1. Проведение анализа существующих методов и средств измерений для определения инструментальной погрешности измерения текущих навигационных параметров НАП системы ГЛОНАСС и разработка схемы передачи единицы времени от первичных эталонов единиц величин к НАП при измерении задержки навигационного сигнала.
2. Разработка метода калибровки имитатора навигационного сигнала системы ГЛОНАСС для обеспечения возможности использования его в качестве эталона для определения инструментальной погрешности измерения теку-

щих навигационных параметров НАП.

3. Разработка метода калибровки НАП системы ГЛОНАСС на основе использования эталонов, прослеживаемых к государственным первичным эталонам единиц величин, с учетом расположения НАП в месте ее эксплуатации без прерывания работы, и верификация результатов калибровки.
4. Исследование влияния учета калибровочных поправок к измерениям псевдодальности НАП на метрологические характеристики канала сличений эталонов единиц времени и частоты и на точность определения местоположения по сигналам системы ГЛОНАСС.

Объектом исследований являются эталоны и средства измерений, обеспечивающие калибровку НАП системы ГЛОНАСС.

Предметом исследования являются методы измерений для определения инструментальной погрешности измерения текущих навигационных параметров НАП системы ГЛОНАСС.

Положения, выносимые на защиту:

1. Применение схемы передачи единицы времени от первичных эталонов единиц величин к НАП при измерении задержки навигационного сигнала обеспечивает определение калибровочных поправок к результатам измерений псевдодальности НАП с учетом ее расположения в местах штатной эксплуатации с суммарной стандартной неопределенностью калибровки не более 0,1 м.
2. Использование многоканального высокочастотного аналого-цифрового преобразования с последующей демодуляцией оцифрованного сигнала с целью выделения квадратурных составляющих и фильтрации обеспечивает калибровку имитатора навигационного сигнала системы ГЛОНАСС в части систематической погрешности формирования псевдодальности с суммарной стандартной неопределенностью калибровки не более 0,03 м.
3. Использование имитатора навигационного сигнала системы ГЛОНАСС, эталона фазовых параметров антенн, прослеживаемых к государственным пер-

вичным эталонам единиц величин обеспечивает калибровку НАП в части систематической инструментальной погрешности измерения псевдодальности с суммарной стандартной неопределённостью калибровки не более 0,06 м.

4. Использование калибровочных поправок к измерениям псевдодальности НАП системы ГЛОНАСС к каждой литерной частоте в частотных диапазонах L1 и L2 обеспечивает сличение эталонов единиц времени и частоты с погрешностью в пределах ± 1 нс и повышение точности определения местоположения на 30 %.

Научная новизна полученных в работе результатов:

1. Разработанный метод калибровки имитатора навигационного сигнала ГЛОНАСС в части систематической погрешности формирования псевдодальности, в отличие от применяемого в настоящее время метода калибровки по минимуму амплитуды навигационного сигнала, основывается на использовании многоканального высокочастотного аналого-цифрового преобразования с последующей демодуляцией оцифрованного сигнала с целью выделения квадратурных составляющих и фильтрацией. Это обеспечивает точное определение перехода фронта навигационного сигнала через ноль, что впервые позволяет достичь значения суммарной стандартной неопределенности калибровки не более 0,03 м, а также проводить калибровку по навигационному сигналу с обеими квадратурными составляющими. На основе материалов разработанного метода калибровки имитатора сигналов ГНСС сформирована заявка на патент на изобретение (рег. № 217144667 от 20.12.2017).
2. Разработанный метод калибровки НАП системы ГЛОНАСС в части систематической инструментальной погрешности измерения псевдодальности на основе использования полунатурного моделирования и измерения фазовых параметров антенно-фидерного тракта впервые обеспечивает оценку значений абсолютных калибровочных поправок как временных задержек

навигационных сигналов от фазового центра антенны до выхода секундной метки внутренней шкалы времени с суммарной стандартной неопределённостью не более 0,06 м.

3. Определение и использование в алгоритме работы аппаратуры сличений эталонов единиц времени и частоты калибровочных поправок, рассчитанных для каждой литерной частоты (от минус 7 до 6) для частотных диапазонов L1 и L2, для сигналов с открытым и санкционированным доступом (итого 56 калибровочных поправок) впервые обеспечило возможность сличений эталонов по сигналам системы ГЛОНАСС с погрешностью в пределах ± 1 нс, что соответствует значению погрешности одного из самых точных методов — с использованием перевозимых квантовых часов.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовался математический аппарат линейной алгебры, теории цепей, математической статистики, теории вероятности, теории функции комплексной переменной и теории погрешности.

Достоверность результатов подтверждается успешной экспериментальной проверкой теоретических выводов, результатами измерений при создании и эксплуатации аппаратно-программных средств калибровки измерительных средств системы ГЛОНАСС с использованием имитатора навигационного сигнала (АПС КИНС), признанием результатов калибровки НАП международным бюро мер и весов BIPM.

Результаты работы внедрены при создании стационарных и мобильных комплексов метрологического обеспечения системы ГЛОНАСС в части радиотехнических измерений (ОКР «Метрология - 2016»), при разработке аппаратно-программных средств калибровки измерительных средств с использованием имитатора навигационного сигнала (составная часть ОКР «Сантиметр»), при выполнении работ по метрологическому обеспечению универсальных станций сбора измерений (составная часть ОКР «КФД-В»), при проведении работ по метрологическому обеспечению наземной станции контроля

и управления бортовой аппаратурой межспутниковых измерений (составная часть ОКР «НСКУ-Н БАМИ»).

Практическая значимость результатов заключается в следующем:

1. Аппаратно-программные средства калибровки измерительных средств с использованием имитатора навигационного сигнала являются исходным средством для обеспечения калибровки беззапросных измерительных средств системы ГЛОНАСС, а также НАП специальных потребителей. В рамках опытной эксплуатации проводятся работы по учету калибровочных поправок к измерениям беззапросных измерительных средств в интересах частотно-временного обеспечения системы ГЛОНАСС.
2. Метод калибровки НАП применялся при калибровке ГЛОНАСС/GPS - приемника частотно-временного назначения TTS-4, принадлежащего Международному бюро мер и весов ВIRM, и используемого для контроля точности передачи системой ГЛОНАСС потребителям национальной шкалы времени UTC(SU) за рубежом. Результаты калибровки признаны ВIRM.
3. Метод калибровки имитатора сигналов системы ГЛОНАСС применяется при аттестации рабочих эталонов координат по ГОСТ Р 8.750-2011, в том числе эталонов ведущих отечественных производителей НАП (АО «КБ «НАВИС», АО «СОКБ «Вектор», АО «Центрсвязьинформ» и др.).

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на VII международном симпозиуме «Метрология времени и пространства» (г. Суздаль Владимирской обл., 2014 г.), международной конференции «Системный анализ, управление и навигация» г. Евпатория, республика Крым, 2016, 2017, 2018 гг.), международной конференции «ION GNSS+» (г. Тампа, США, 2015 г.), научно-практических конференциях молодых учёных, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке» (Менделеево, ФГУП «ВНИИФТРИ», 2016, 2017, 2018 гг.), 6-ой Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение КВНО-2015» (г. Санкт-Петербург, 2015 г.), 7-ой

Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение КВНО-2017» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.).

Материалы диссертации опубликованы в 13 статьях, в том числе в 4 статьях в изданиях из Перечня ВАК российских рецензируемых изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации, и 10 докладах на научно-технических конференциях.

1 Анализ методов и средств оценки инструментальной погрешности измерений псевдодальности навигационной аппаратурой потребителей системы ГЛОНАСС

1.1 Анализ составляющих погрешности измерений псевдодальности по сигналам ГЛОНАСС

Основное назначение навигационной аппаратуры потребителей системы ГЛОНАСС – приём и обработка радиосигналов навигационных космических аппаратов системы с целью определения пространственно-временных координат потребителя, его вектора скорости, пространственной ориентации и т.п.

В НАП классической конструкции на первом этапе измеряются параметры радионавигационных сигналов от НКА (задержки, приращения фазы, доплеровские смещения частоты), а также извлекается информация о параметрах движения НКА. Второй этап – решение навигационной задачи (РНЗ) – расчёт координат потребителя и параметров его движения по исходным данным, полученным на первом этапе [2].

Самый распространённый метод решения навигационной задачи – псевдодальномерный – основан на измерении псевдодальности до НКА с известным положением. Псевдодальность – это дальность, измеренная беззапросным методом, то есть сумма времени распространения сигнала и разности шкал времени источника сигнала (НКА) и приёмника (НАП), умноженная на скорость распространения сигналов, то есть скорость света. Выражение для псевдодальностей, измеряемых потребителем, может быть представлено в следующем виде:

$$R_i = \sqrt{(x_{\text{НКА}_i} - x_{\text{НАП}})^2 + (y_{\text{НКА}_i} - y_{\text{НАП}})^2 + (z_{\text{НКА}_i} - z_{\text{НАП}})^2} + c \cdot \Delta t_i, \quad (1.1)$$

где $x_{\text{НКА}_i}, y_{\text{НКА}_i}, z_{\text{НКА}_i}$ – координаты i -го НКА, рассчитанные на основе передаваемой эфемеридной информации,

$x_{\text{НКА}_i}, y_{\text{НКА}_i}, z_{\text{НКА}_i}$ – координаты потребителя,

Δt_i – расхождение шкалы времени потребителя и системной шкалы времени ГЛОНАСС в предположении, что бортовые шкалы времени НКА синхронны между собой,

c – скорость света.

Погрешность определения координат местоположения псевдодальномерным методом описывается выражением [2, 3, 4]:

$$\Delta(X, Y, Z) = \Delta R \cdot \Gamma\Phi, \quad (1.2)$$

где ΔR – погрешность измерения псевдодальности,

$\Gamma\Phi$ или PDOP (Position Dilution of Precision) – пространственный геометрический фактор.

Т.е. погрешность определения координат местоположения прямо зависит от погрешности измерений псевдодальности. Геометрический фактор зависит от конфигурации видимой спутниковой группировки, как правило не превышает 2.

В свою очередь, погрешность измерения псевдодальности включает несколько основных составляющих и может быть представлена как сумма погрешностей [2, 4]:

$$\Delta R = \Delta_{\text{ЭВИ}} + \Delta_{\text{атм}} + \Delta_{\text{РГЭ}} + \Delta_{\text{млр}} + \Delta_{\text{НАП}} + \varepsilon_R, \quad (1.3)$$

где $\Delta_{\text{ЭВИ}}$ – составляющая погрешности измерения псевдодальности за счёт эфемеридно - временного обеспечения (далее – ЭВИ),

$\Delta_{\text{атм}}$ – составляющая за счёт задержек навигационного сигнала (далее - НС) в атмосфере,

$\Delta_{\text{РГЭ}}$ – составляющая за счёт релятивистских и гравитационных эффектов (далее - РГЭ),

$\Delta_{\text{млр}}$ – составляющая за счёт многолучевого распространения НС,

$\Delta_{\text{НАП}}$ – составляющая за счёт инструментальной (аппаратурной) погрешности измерения псевдодальности,

ε_R – прочие составляющие погрешности.

Погрешность измерений псевдодальности за счет бортовой ЭВИ $\Delta_{\text{ЭВИ}}$ – один из основных точностных показателей системы. Эту составляющую также называют *погрешностью за счёт космического сегмента*. В настоящее время ведутся работы по поддержанию, развитию и использованию системы ГЛОНАСС, при этом $\Delta_{\text{ЭВИ}}$ должна быть уменьшена с нынешнего значения 1,4 м до 0,7 м и достичь 0,5 м в 2020 году.

Погрешность измерений псевдодальности $\Delta_{\text{атм}}$ за счёт задержек навигационного сигнала в атмосфере складывается из двух частей: задержка распространения в ионосфере и задержка распространения НС в тропосфере. Природа этих задержек разная и устраняют их разными методами. Ионосферную задержку на 99,9% компенсируют за счёт измерений по навигационному сигналу в нескольких частотных диапазонах, так что остаточное значение этой погрешности не превышает 0,1 м [5]. Тропосферную задержку компенсируют с применением различных моделей, лучшие из которых позволяют обеспечить некомпенсированную тропосферную задержку не более 1 нс, что соответствует погрешности измерения псевдодальности не более 0,3 м [2, 3, 5, 6]. Таким образом, можно утверждать, что суммарная погрешность $\Delta_{\text{атм}}$ не превышает 0,4 м.

Погрешность измерений псевдодальности за счёт релятивистских и гравитационных эффектов $\Delta_{\text{РГЭ}}$ также компенсируется с помощью соответствующих моделей погрешностей измерений. Современные модели позволяют обеспечить некомпенсированный остаток на уровне менее 0,1 м [5].

С погрешностью измерений псевдодальности из-за многолучевого распро-

странения радионавигационного сигнала $\Delta_{\text{млр}}$ борются преимущественно применением приёмных антенн с диаграммой направленности, подавляющей сигналы из нижней полусферы. Также широко применяются специализированные алгоритмы обработки сигналов и результатов измерений, снижающие влияние многолучёвого распространения сигналов от НКА [7]. В нормальных условиях приёма навигационного сигнала для современных НАП с высококачественной приёмной антенной вклад составляющей $\Delta_{\text{млр}}$ в общую погрешность измерения псевдодальности не превышает 0,5 м [3, 5].

Для самых точных образцов навигационной аппаратуры из состава метрологических комплексов величина инструментальной погрешности измерения псевдодальности $\Delta_{\text{НАП}}$ по сигналам ГНСС ГЛОНАСС превышает 2 м по результатам экспериментальных исследований различных лабораторий и институтов из разных стран [8, 9, 10, 11].

Все описанные составляющие сведены в общую таблицу 1.1.

Таблица 1.1. Составляющие погрешности измерений псевдодальности НАП ГЛОНАСС

Источник погрешности	Остаточное значение	Примечание
ЭВИ, $\Delta_{\text{ЭВИ}}$, м	0,7	к 2018 г.
Атмосфера, $\Delta_{\text{атм}}$, м	0,4	двухчастотные измерения, применение моделей
РГЭ, $\Delta_{\text{РГЭ}}$, м	0,1	применение моделей
Многолучёвое распространение, $\Delta_{\text{млр}}$, м	0,5	Конструкция антенны, алгоритмы обработки
Инструментальная погрешность, $\Delta_{\text{НАП}}$, м	>2	

Из таблицы видно, что с учетом перспектив развития системы ГЛОНАСС, инструментальная погрешность НАП вносит наиболее существенный вклад в общую погрешность измерения псевдодальности.

1.2 Анализ требований к погрешности измерения первичных навигационных параметров

Для достижения потенциальной точности определения местоположения и времени, которую потребитель может получить при приеме сигналов ГЛОНАСС, необходимо обеспечить значение инструментальной погрешности измерений псевдодальности НАП, существенно малое по сравнению с погрешностью измерений за счет бортовой ЭВИ (минимум в 3 раза меньше). Таким образом, **требования к инструментальной погрешности измерений псевдодальности НАП могут быть установлены значением 0,2 м.**

Сравнимое значение инструментальной погрешности измерения псевдодальности требуется и для обеспечения целочисленного разрешения фазовой неоднозначности, необходимого для реализации технологии PPP, обеспечивающей сантиметровый уровень точности измерения координат в глобальном масштабе. В диссертационной работе Скакуна И.О. было доказано, что для использования целочисленного свойства параметров фазовой неоднозначности измерений набора приемников навигационных сигналов необходимо обеспечить разность систематических смещений кодовых измерений между двумя НКА не более 17 см для всех приемников в обработке [12]. Это требование эквивалентно требованию обеспечить **систематическую инструментальную погрешность измерений псевдодальности для всех НАП не более 0,17 м.**

Таким образом, в настоящий момент актуальным является требование обеспечить инструментальную погрешности измерения псевдодальности НАП ГЛОНАСС **не более 0,2 м.**

В первую очередь это требование относится к наиболее сложным и дорогостоящим классам НАП, таким как: беззапросные измерительные системы из

состава наземного сегмента системы ГЛОНАСС, частотно-временные НАП, НАП из состава беспилотного транспорта, автоматизированной сельскохозяйственной техники.

Основная причина инструментальной погрешности НАП – задержка навигационного сигнала в тракте НАП. Радиочастотный тракт НАП содержит частотно-зависимые элементы: фильтры, усилители, аттенюаторы и т.п., и задержка распространения навигационного радиосигнала в этих элементах зависит от спектральных характеристик сигнала (его центральной частоты и ширины спектра). При этом в системе ГЛОНАСС применяется частотное разделение сигналов в нескольких диапазонах частот $L1 = 1602 + n \cdot 0,5625$ МГц и $L2 = 1246 + n \cdot 0,4375$ МГц, где $n =$ от минус 7 до 6, а также кодовое разделение сигналов в диапазонах частот $L1=1600,995$ МГц, $L2=1248,060$ МГц и $L3=1202,025$ МГц. Навигационные сигналы ГЛОНАСС на разных несущих частотах имеют различные значения задержки при прохождении по приемному тракту НАП, т.е. задержка для всех принимаемых сигналов будет разной, что обуславливает наличие инструментальной погрешности измерения псевдодальности НАП. Значения этой погрешности по результатам экспериментальных исследований могут достигать единиц метров для разных литер в пределах одного частотного диапазона как показано на примере 1.1, и превышать десять метров для сигналов из разных частотных диапазонов [13].

Задержка распространения сигнала в тракте в общем случае зависит от температуры. По результатам экспериментальных исследований, изменение ГВЗ в радиочастотном кабеле длиной 30 метров в диапазоне частот навигационных сигналов ГЛОНАСС при перепаде температур от минус 20° С до 40° С достигает 0,5 нс, что эквивалентно псевдодальности 0,15 м [14, 15]. В тракте с активными радиотехническими устройствами, зависимость усугубляется. Задержку можно считать постоянной только в условиях ограничения условий эксплуатации нормальными лабораторными условиями (от минус 20° С до 40° С).

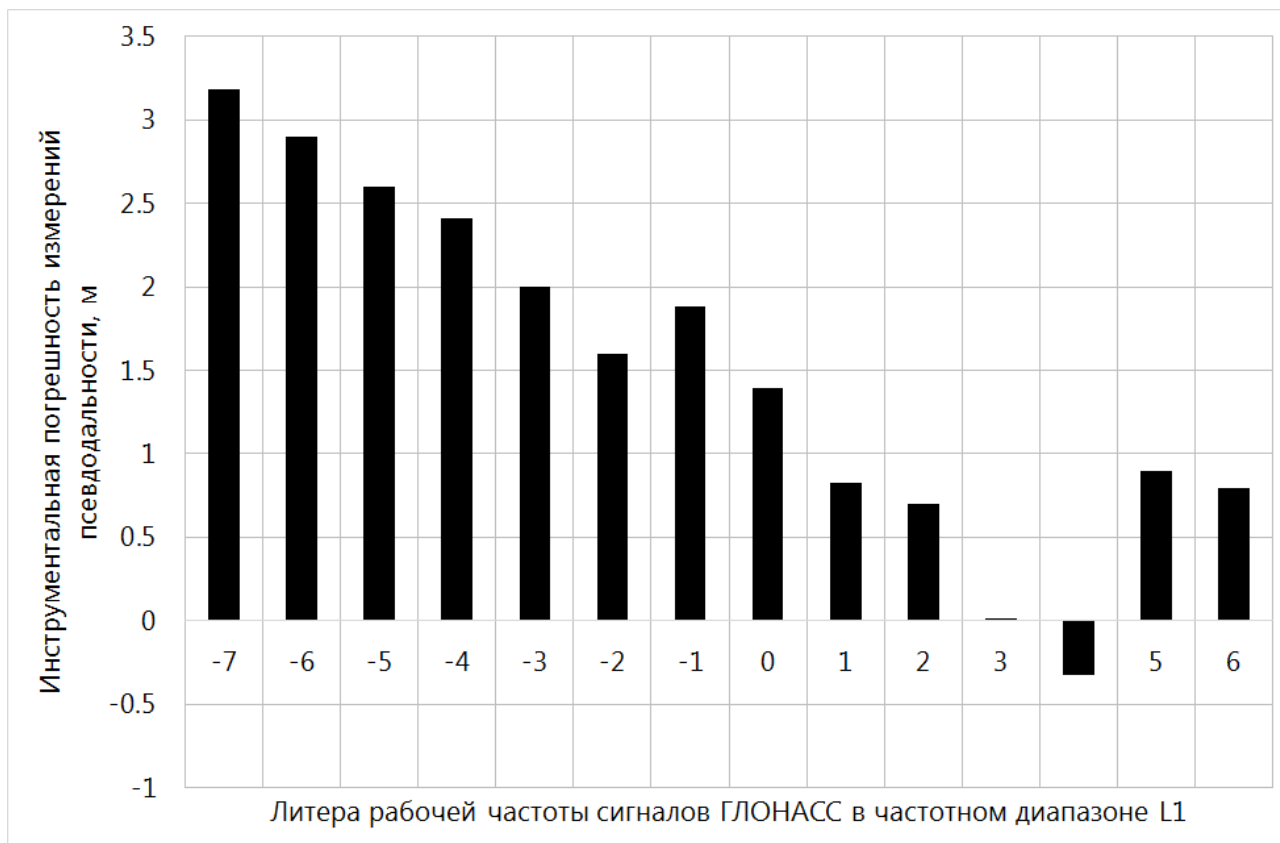


Рис. 1.1 – Типовые значения калибровочных поправок к измерениям псевдодальности по сигналам ГЛОНАСС НАП отечественного производства

Также задержка зависит от составных частей тракта. Даже усилители одной марки одного производителя могут иметь существенно разное ГВЗ в диапазоне навигационных сигналов ГЛОНАСС, различия могут достигать единиц наносекунд. Постоянной задержку можно считать только при условии неизменности всех элементов тракта НАП.

Таким образом, задержка навигационного сигнала в радиочастотном тракте НАП может быть принята постоянной величиной при выполнении следующих условий:

- отсутствие значительных перепадов температуры;
- отсутствие перекоммутаций;
- коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) в тракте не превышает 1,5 [16, 17].

Принимая инструментальную погрешность измерений НАП постоянной

величиной с учетом соблюдения условий проведения измерений, следует, что инструментальная погрешность может быть определена по результатам калибровки и учтена.

Калибровке должны подвергаться и беззапросные измерительные системы (БИС) из состава наземного сегмента ГЛОНАСС, которые представляют собой постоянно действующие узкоспециализированные НАП. БИС и подобные им измерительные станции должны осуществлять измерения круглосуточно без перерывов и не могут быть перемещены, калибровать их можно только без вывода из эксплуатации в местах штатного размещения.

Поскольку необходимо обеспечить остаточную инструментальную погрешность измерения псевдодальности НАП не более 0,2 м, следовательно, суммарная стандартная неопределённость калибровки НАП должна быть не более 0,1 м (при коэффициенте охвата 2). Для обеспечения единства измерений результаты калибровки должны прослеживаться к первичным эталонам единиц величин.

Потребность проведения калибровки НАП в части систематической погрешности измерений псевдодальности, обусловленной задержками навигационного сигнала в тракте НАП также рассматривалась в [18, 19, 4].

1.3 Анализ существующих методов калибровки НАП в части систематической погрешности измерений псевдодальности

Калибровка НАП может проводиться как по измерениям первичных навигационных параметров, таким как псевдодальность, псевдоскорость, фаза несущей, так и по измерениям вторичных параметров: координаты, расхождение шкал времени, скорость. Существующие эталоны, наиболее близкие к измерению группового времени запаздывания (первичный эталон единицы времени и частоты ГЭТ 1 и первичный эталон единицы угла фазового сдвига ГЭТ 207) конструктивно не позволяют калибровать НАП по первичным параметрам. Для этого применяются особые технические средства и методы.

Калибровка по вторичным параметрам широко используется, рассматривалась в работах О.В. Денисенко, В.В. Дворкина [20, 21, 22] и других учёных. Результаты калибровки могут быть прослежены к первичным эталонам времени (ГЭТ 1-2018) и длины (ГЭТ 1-2018). Но есть принципиальное ограничение – калибровочные поправки ко вторичным параметрам невозможно пересчитать в калибровочные поправки к первичным, из-за этого такой подход не позволяет достичь требуемых значений точности определения координат и шкалы времени. Поэтому в диссертационной работе калибровка по вторичным параметрам не рассматривалась.

На сегодняшний день применяются три основных метода калибровки НАП в части систематической инструментальной погрешности измерения псевдодальности:

1. Дифференциальный. Калибровка относительно виртуальной «средней по сети» НАП либо относительно условно эталонного образца.
2. Схемотехнический. Калибровка путём включения в РЧ тракт элементов, обеспечивающих измерение разности ГВЗ на разных частотах в процессе эксплуатации НАП.
3. Полунатурный. Калибровка с применением специализированных устройств – имитаторов сигналов ГНСС, которые выступают в качестве источников эталонного навигационного сигнала.

1.3.1 Метод дифференциальной калибровки

Метод используется большинством производителей НАП при выпуске продукции, что позволяет обеспечить сходимость выпускаемых измерительных средств между собой. Также применяется в метрологических лабораториях (USNO, PTB, BIPM) для калибровки канала сличений удалённых эталонов времени и частоты по сигналам ГНСС [23, 24, 25, 26, 27, 28].

Заключается в определении калибровочных поправок к измерениям калибруемой НАП относительно условно эталонной НАП в процессе одновре-

менных измерений одних и тех же псевдодальностей по сигналам ГНСС в одинаковых условиях внешней среды. Фактически реализуется метод непосредственных сравнений, при этом обеспечивается возможность калибровки постоянно действующей стационарной НАП без прерывания штатной работы. Однако каждая лаборатория использует свой образец «эталонной» НАП, в результате образцы разных производителей демонстрируют расхождение систематических погрешностей измерений псевдодальности на уровне единиц метров. По этой же причине результаты калибровки нельзя проследить ни к каким первичным эталонам.

Несколько иная версия этого метода практикуется аналитическими центрами, которые рассчитывают высокоточную эфемеридно-временную информацию и другие продукты по результатам обработки измерений сети НАП ГНСС. Яркий пример - центры обработки международной сети IGS (International GNSS Service [29]). В отличие от подхода производителей, в качестве эталонного образца в подобных сетях применяется не конкретный экземпляр НАП, а виртуальный, средний по сети. Подробно вопрос расчёта калибровочных поправок при обработке измерений сети станций рассматривается в работах В.В. Митрикаса, И.О Скакуна, О. Montenbruck, А. Hauschild, S. Schraer, J. В. Neumann и других учёных [30, 31, 32, 33, 34, 35, 36]. При таком подходе результаты расчёта калибровочных поправок к измерениям псевдодальности будут зависеть ещё и от состава и состояния сети измерительных станций (НАП), также нельзя говорить о прослеживаемости результатов калибровки к первичным эталонам.

Вторая проблема подобного подхода – необходимость введения дополнительных условий для разрешения проблемы ненаблюдаемости системы. Чаще всего накладывается условие равенства нулю суммы всех калибровочных поправок по всем литерам рабочей частоты сигналов ГЛОНАСС, линейной зависимости значения калибровочной поправки от номера литеры и др. То есть, корректным результатом является разность калибровочных поправок между

собой, но не абсолютные значения самих поправок.

1.3.2 Схемотехнический метод калибровки

Метод основан на встраивании в НАП устройств для оперативного измерения изменения задержки навигационных сигналов в радиочастотном тракте. Метод позволяет проводить калибровку «на лету», без вывода из эксплуатации, и в автоматическом режиме учитывать оценённые калибровочные поправки в измерениях. Различные реализации этого метода используются многими отечественными и зарубежными производителями НАП [37, 38, 39].

На рисунке 1.2 показана схема радиотехнического тракта НАП [39]. Для реализации задачи калибровки группового времени запаздывания (ГВЗ) в тракте обработки сигналов системы GPS и на литерных частотах в тракте обработки сигналов системы ГЛОНАСС на второй вход сумматора подаются сигнал от встроенного имитационного тракта.

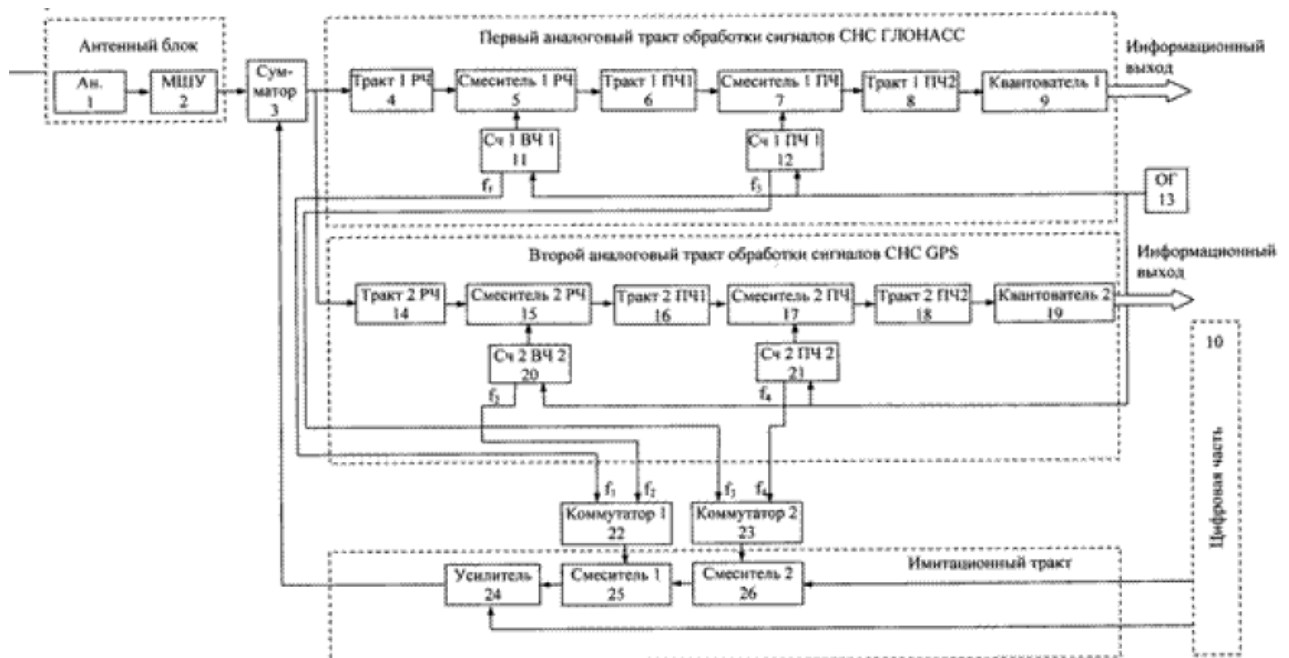


Рис. 1.2 – Схема НАП с имитационным трактом

Метод имеет следующие недостатки:

1. обеспечивается только стабильность систематической инструментальной

погрешности измерения псевдодальности, сами значения погрешности могут быть любыми;

2. применим только к образцам НАП, для которых подобная возможность была заложена при разработке;
3. калибровке подвергается не весь радиочастотный тракт НАП, а лишь некоторая его часть, в соответствии с конструкцией.

В силу сложности технической реализации аппаратуры с подобными механизмами самокалибровки и невысокой точности метода, широкого распространения такие НАП не получили.

1.3.3 Полунатурный метод

Метод основан на применении имитаторов сигналов ГНСС в качестве источников эталонного навигационного сигнала. Рассматривается в работах С.Н. Карутина, В.Н. Федотова, Ю.С. Яскина [40, 22, 41, 42, 43, 44] и других учёных. Однако, в приведённых работах рассматривалась в основном случайная составляющая погрешности измерения, и требования к инструментальной погрешности НАП существенно превышали значения, рассматриваемые в данной диссертационной работе.

Именно этот метод предусмотрен действующей государственной поверочной схемой координатно-временных средств измерений ГОСТ Р 8.750-2011. На рисунке 1.3 показан фрагмент этой схемы, непосредственно относящийся к НАП. Из схемы следует, что НАП в части погрешности измерения псевдодальности должна прослеживаться к имитаторам сигналов ГНСС, которые в свою очередь должны прослеживаться к первичному специальному эталону координат местоположения.

Однако, первичный эталон координат местоположения в настоящий момент не существует, т.е. имитаторы сигналов ГНСС в части погрешности формирования псевдодальности не прослеживаются к первичным эталонам, а следовательно, не прослеживается и НАП. Имитаторы сигналов ГНСС про-

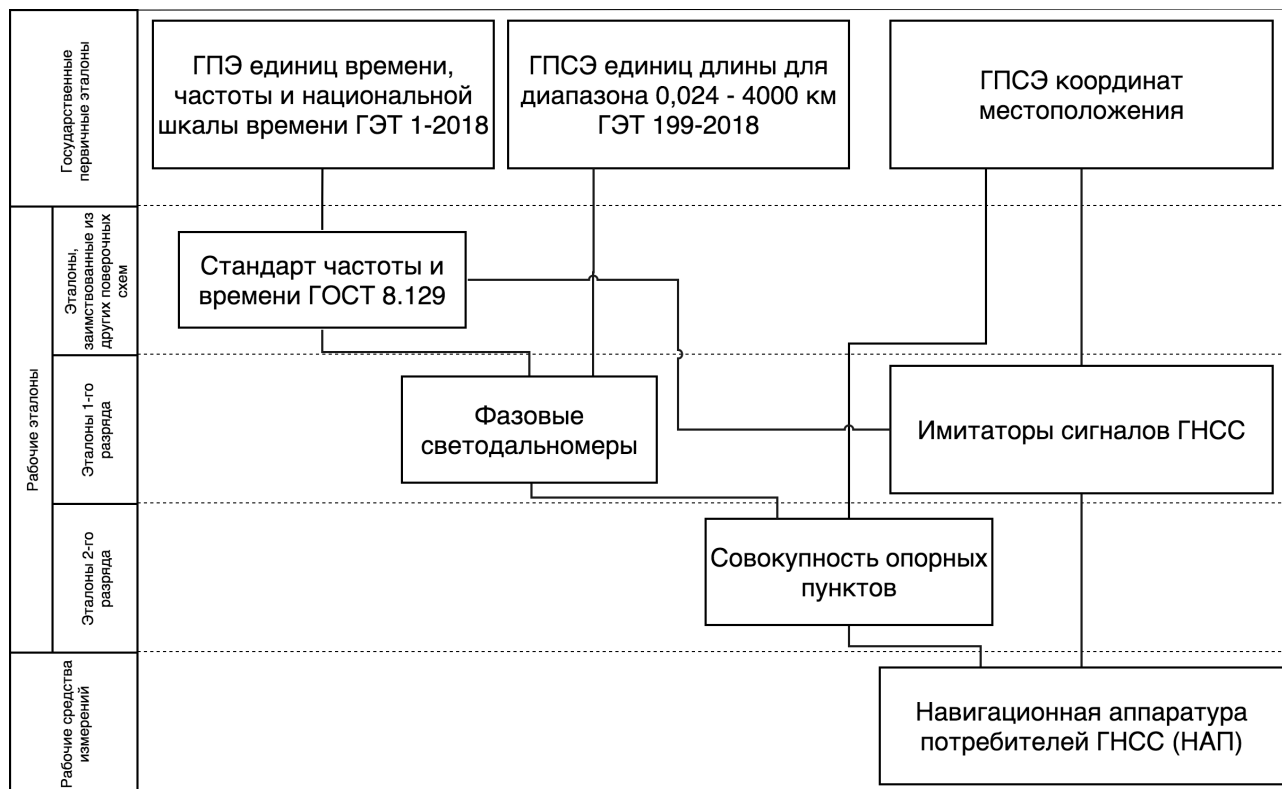


Рис. 1.3 – Фрагмент ГПС координатно-временных средств измерений

слеживаются к первичному эталону единиц времени и частоты ГЭТ 1-2018, НАП в части погрешности синхронизации также прослеживается к ГЭТ 1, а в части измерений приращений координат к первичному специальному эталону единиц длины ГЭТ 199-2018. Т.е. метод имеет принципиальный изъян – он не позволяет проследить результаты калибровки к первичным эталонам единиц величин.

Метод имеет и другие недостатки:

- описанные на сегодняшний день методы предусматривают расчёт калибровочных поправок только к измерениям из разных частотных диапазонов L1 и L2. Этого достаточно для НАП по сигналам GPS, но в ГЛОНАСС применяется частотное разделение, а значит калибровочные поправки должны рассчитываться для каждой литеры рабочей частоты отдельно [34, 15];
- имитатор сигналов ГНСС также имеет радиочастотный тракт с частотно-зависимыми элементами, которые обуславливают зависимость ГВЗ навигационного сигнала от рабочей частоты. То есть имитатор нуждается в ана-

логичной калибровке, цель которой - определить систематические составляющие инструментальной погрешности формирования псевдодалности для каждой рабочей частоты навигационного сигнала;

- калибровка охватывает только приёмно-измерительное устройство, не затрагивая антенно-фидерное устройство (АФУ) НАП. В то же время АФУ также вносит существенный вклад в общую задержку навигационного сигнала, а значит и систематическую погрешность измерений псевдодалности [45, 18, 46];
- метод предполагает необходимость разъединения основных составных частей НАП: АФУ, антенного кабеля, приёмно-измерительного устройства. Это не всегда возможно, особенно для НАП, выполняющих непрерывные измерения в местах штатной эксплуатации.

Первый недостаток может быть устранён путём разработки метода калибровки имитаторов сигналов ГНСС в части систематической погрешности формирования псевдодалности. Если результаты калибровки имитатора можно будет проследить к первичным эталонам единиц величин – появится возможность применения полунатурного метода для калибровки приёмно-измерительного устройства НАП также с обеспечением прослеживаемости. Метод разработан в настоящей работе и подробно описан ниже (глава 2)

В работах [47, 48, 49] представлен метод калибровки антенно-фидерного устройства НАП в части группового времени запаздывания, что позволяет рассчитать калибровочные поправки к измерениям псевдодалности для НАП в целом. Методология расчётов подробно изложена ниже (глава 3).

1.4 Разработка схема передачи единицы времени от первичных эталонов единиц величин к НАП при измерении задержки навигационного сигнала

Как показано ранее (раздел 1.3) ни один из применяемых в настоящее время методов калибровки НАП не позволяет решить задачу обеспечения един-

ства измерений НАП с требуемой точностью.

По результатам анализа, наиболее предпочтительно для решения задачи калибровки НАП системы ГЛОНАСС в части систематической инструментальной погрешности измерений псевдодалности в местах штатного размещения без вывода из эксплуатации использовать метод дифференциальной калибровки (метод непосредственных сравнений) относительно эталонного комплекта НАП. Как показано ранее (раздел 1.2). Для достижения остаточной систематической инструментальной погрешности измерений псевдодалности НАП системы ГЛОНАСС на уровне 0,2 м необходимо обеспечить суммарную стандартную неопределённость калибровки u_C не более 0,1 м.

Для калибровки эталонного комплекта НАП в части систематической инструментальной погрешности измерений псевдодалности необходимо разработать метод калибровки НАП в целом, который обеспечит прослеживаемость результатов калибровки к первичным эталонам единиц величин. Принимая во внимание методическую погрешность метода дифференциальной калибровки [50], необходимо обеспечить суммарную стандартную неопределённость калибровки эталонного комплекта не более 0,06 м. Метод и бюджет неопределённости подробно рассмотрен далее (раздел 3). Метод основан на прямых измерениях с использованием имитаторов сигналов ГЛОНАСС и эталона единицы группового времени запаздывания в антеннах НАП с последующим расчётом калибровочных поправок для полного комплекта НАП в целом.

Суммарная стандартная неопределённость калибровки эталонного комплекта НАП не должна превышать 0,06 м, при этом суммарную стандартную неопределённость калибровки антенн НАП в части ГВЗ составляет 0,1 нс, что эквивалентно систематической погрешности псевдодалности 0,03 м [47]. Поскольку неопределённость калибровки эталонной НАП включает в себя неопределённость калибровки АФУ и имитатора сигналов ГНСС в части систематической погрешности псевдодалности, то необходимо обеспечить суммарную стандартную неопределённость калибровки имитаторов не более 0,03 м.

Метод калибровки имитатора, описание и расчёт бюджета неопределённости приведены далее (глава 2).

На рисунке 1.4 показана предложенная в [51] схема передачи единицы времени от государственных первичных эталонов единиц величин к НАП при измерении задержки навигационного сигнала. Поскольку задержка навигационного сигнала обуславливает систематическую погрешность измерений псевдодальности, эта схема по показывает прослеживаемость НАП к ГПЭ в части систематической погрешности измерения псевдодальности. Цветом выделены элементы, которые отсутствуют в существующей государственной поверочной схеме ГОСТ Р 8.750-2011

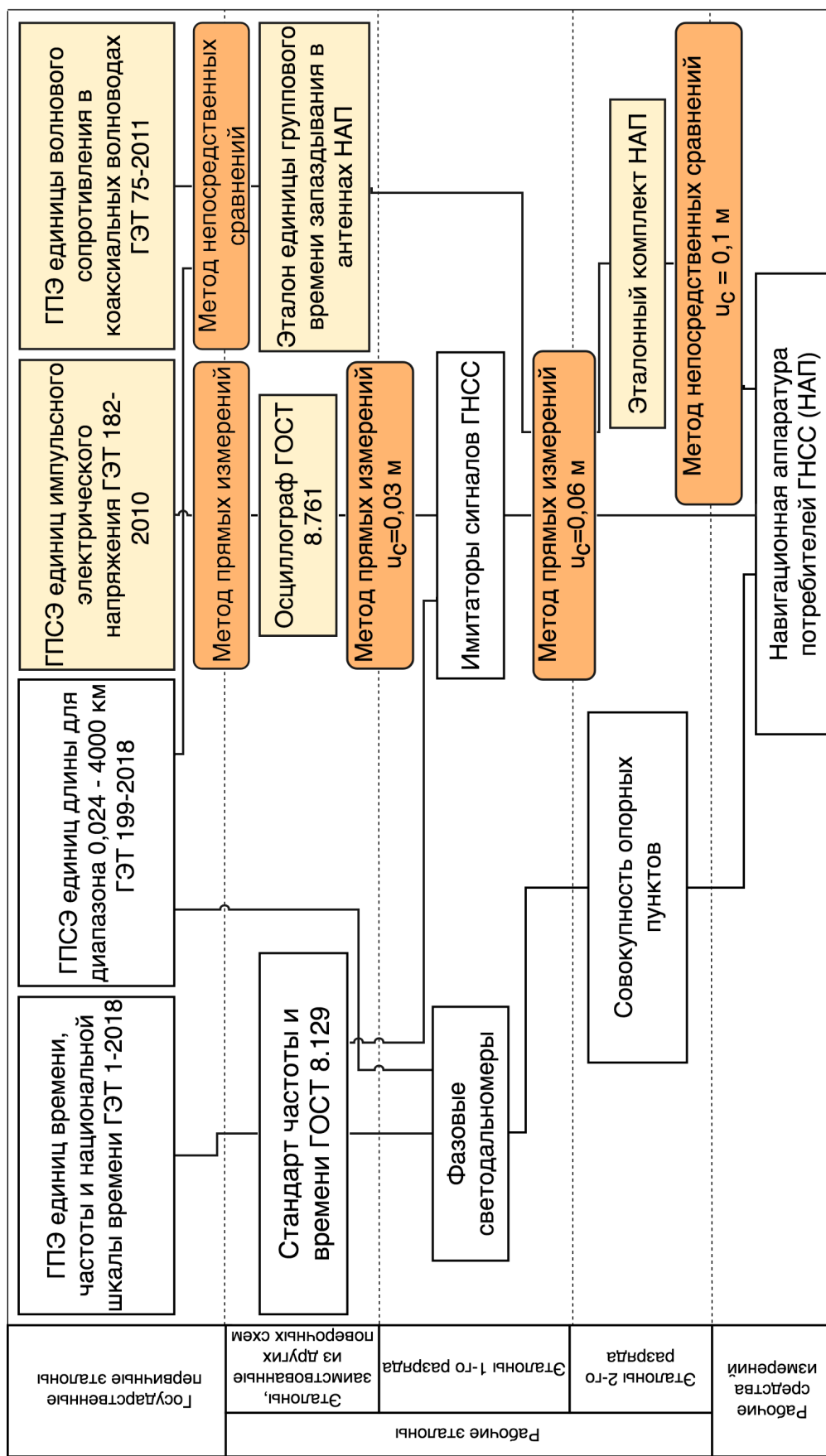


Рис. 1.4 – Схема передачи единицы времени от государственных первичных эталонов единиц величин к НАП при измерении задержки навигационного сигнала

Согласно схеме, НАП системы ГЛОНАСС в части погрешности измерений псевдодальности (задержки навигационного сигнала) прослеживаются к государственному первичному эталону единиц времени и частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018, государственному первичному специальному эталону единиц длины ГЭТ 199-2018, государственному первичному специальному эталону единиц импульсного электрического напряжения ГЭТ 182-2010 и государственному первичному эталону единицы волнового сопротивления в коаксиальных волноводах ГЭТ 75-2011 [52]. Применение этой схемы позволит обеспечить калибровку НАП в части систематической инструментальной погрешности измерения псевдодальности без прерывания работы в местах штатной эксплуатации с суммарной стандартной неопределённостью не более 0,1 м.

1.5 Выводы

1. Инструментальная погрешность измерений псевдодальности вносит существенный вклад в погрешность решения навигационной задачи НАП системы ГЛОНАСС. Для достижения потенциальной точности определения координат местоположения и времени потребителя по сигналам ГЛОНАСС, необходимо обеспечить калибровку НАП в части систематической погрешности измерений псевдодальности с суммарной стандартной неопределённостью u_c не более 0,1 м. Калибровка должна осуществляться в местах штатного размещения без прерывания работы.
2. Анализ методов калибровки НАП в части систематической погрешности измерений псевдодальности показал, что применяемые в настоящее время методы не позволяют проводить калибровку НАП с требуемой точностью (необходимо обеспечить суммарную стандартную неопределённость калибровки $u_c \leq 0,1$ м). Государственные первичные эталоны (ГПЭ) единиц величин, наиболее близкие к измерению задержки навигационного сигнала как интервала времени (ГЭТ 1-2018, ГЭТ 207-2013) не позволяют калибро-

вать НАП по измерениям первичных навигационных параметров (псевдодальность), а калибровка по вторичным параметрам (координаты, время) имеет точность на порядок хуже требуемой. Не обеспечивается прослеживаемость результатов калибровки НАП к первичным эталонам единиц величин.

3. Разработана схема передачи единицы времени от ГПЭ к НАП при измерении задержки навигационного сигнала. Применение схемы обеспечивает определение калибровочных поправок к результатам измерений псевдодальности НАП с учетом ее расположения в местах штатной эксплуатации с суммарной стандартной неопределенностью калибровки u_c не более 0,1 м.
4. Установлено, что для реализации предложенной схемы передачи необходимо разработать метод калибровки НАП с суммарной стандартной неопределенностью u_c не более 0,06 м.
5. Установлено, что для калибровки НАП с требуемой точностью необходимо использование метода полунатурного моделирования, для чего требуется разработать метод калибровки имитаторов навигационных сигналов ГЛОНАСС в части систематической погрешности формирования псевдодальности с суммарной стандартной неопределенностью u_c не более 0,03 м.

2 Метод калибровки имитатора навигационных сигналов ГЛОНАСС в части систематической погрешности формирования псевдодальности

2.1 Основные принципы работы имитаторов сигналов ГНСС

Имитаторы широко применяются для испытаний навигационной аппаратуры потребителей ГЛОНАСС и других ГНСС (GPS, Galileo, Beidou и др.). Их применяют производители НАП, метрологические лаборатории, специализированные испытательные структуры. В отличие от натуральных испытаний, имитаторы обеспечивают полное управление формируемыми навигационными сигналами, позволяют проводить испытания в условиях, которые очень сложно или вовсе невозможно получить в реальности (например испытания с перспективными сигналами ГНСС).

Имитаторы позволяют формировать навигационное поле, как совокупность навигационных сигналов, для любых точек поверхности Земли или околоземного пространства для произвольных моментов времени. Также позволяют моделировать перемещение испытуемого объекта в соответствии с заложенными параметрами движения. Динамика объекта может быть очень высока, многие модели имитаторов позволяют имитировать движение даже самых скоростных объектов. При этом могут моделироваться различные факторы, влияющие на навигационный сигнал, принимаемый испытуемым объектом: атмосферные эффекты (задержки в ионосфере, тропосфере), многолучевое распространение, помехи, погрешности эфемеридно-временной информации и др. Ещё одно ключевое преимущество имитаторов – повторяемость условий испытаний. Любой сценарий имитации может воспроизводиться произвольное количество раз для разных образцов НАП, что совершенно необходимо для сравнительных испытаний.

Используют имитаторы и для калибровки НАП в части систематической

погрешности измерения псевдодальности. Такой подход подробно описан и рассмотрен в работах многих авторов, как отечественных, так и зарубежных [53, 54, 40, 22, 41, 42, 43, 44, 34, 15].

2.1.1 Описание функционирования имитаторов сигналов ГНСС

Имитатор сигналов ГНСС представляет собой генератор высокочастотных радиосигналов специальной формы в совокупности с вычислителем и специализированным программно-математическим обеспечением.

В общем случае упрощенный алгоритм функционирования имитаторов содержит следующие этапы:

1. Пользователь задаёт условия имитации: формируемые навигационные сигналы, траектория движения имитируемого объекта, параметры среды распространения и спутниковой группировки и пр.
2. На основе исходных данных рассчитываются навигационные параметры: псевдодальность до НКА, его радиальная скорость и т.д. Формируется навигационное сообщение для каждого НКА.
3. Навигационные параметры преобразуются в соответствующие им радионавигационные параметры: задержка, доплеровское смещение несущей частоты навигационного сигнала.
4. Имитатор сигналов ГНСС формирует навигационный сигнал с рассчитанными радионавигационными параметрами.

В основном на этапе формирования навигационного сигнала по рассчитанным параметрам и вносится инструментальная погрешность формирования псевдодальности, обусловленная задержкой навигационного сигнала в радиочастотном тракте имитатора.

На рисунке 2.1 показана функциональная схема серийного имитатора NavX-NCS Professional [55] производства фирмы Work Microwave, Германия (№ ГРСИ 55231-13), которая типична для большинства серийных имитаторов сигналов ГНСС. Основным интерес представляет радиотехническая часть, которая

в основном и обуславливает инструментальную погрешность формирования навигационных параметров.

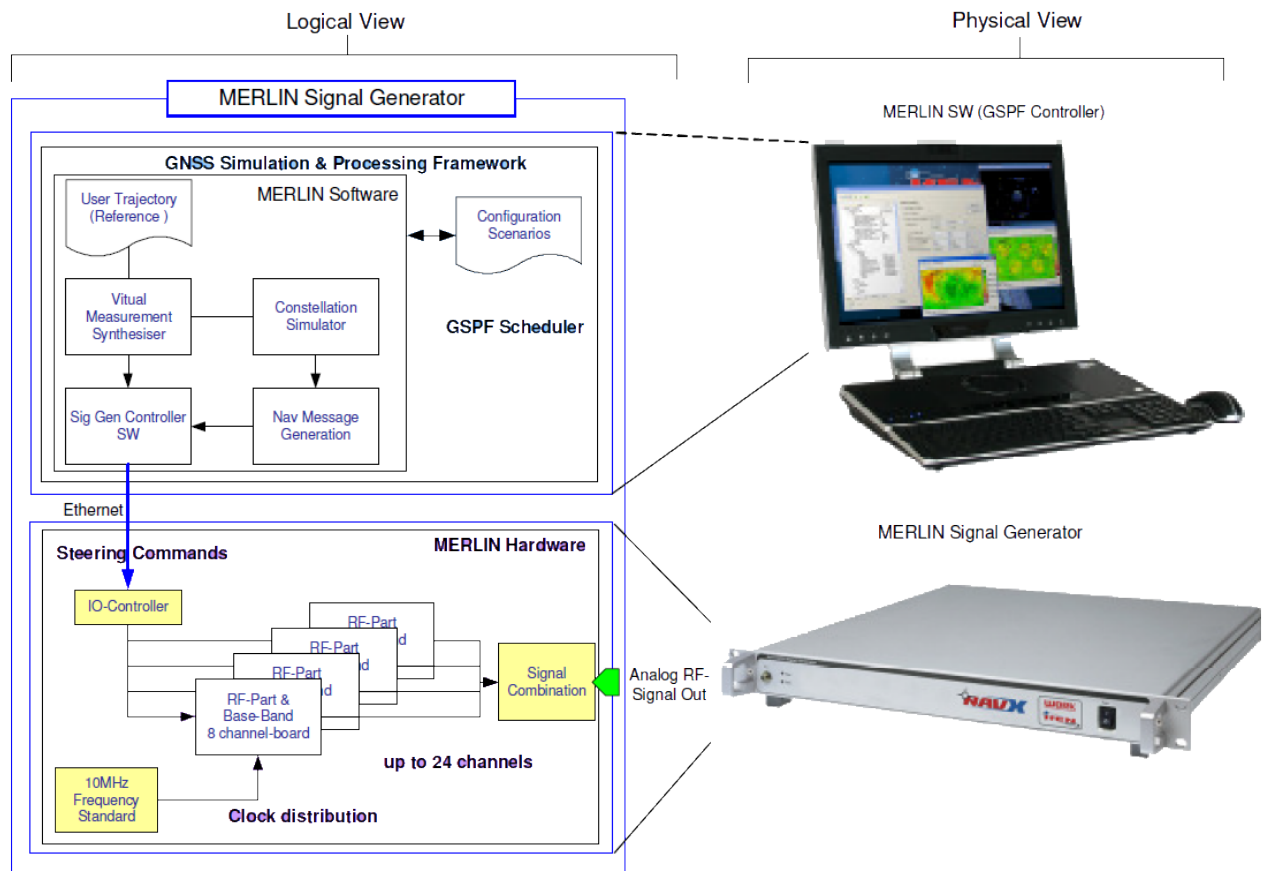


Рис. 2.1 – Структурная схема имитатора сигналов ГНСС NavX-NCS Professional

На рисунке 2.2 [56] показана структурная схема радиотехнической части типового имитатора сигналов ГНСС. Как показано на рисунке навигационный сигнал большой мощности (до минус 70 дБВт) формируется для разных частотных диапазонов каждой ГНСС отдельными генераторами. Сформированный сигнал большой мощности (до минус 90 дБВт) с выходов Mon/Cal генераторов суммируется, ослабляется до номинального уровня навигационного сигнала [57, 58, 59], после чего подаётся на антенный вход испытуемой НАП. Также для испытаний доступен выход опорной частоты 10 МГц и секундной метки шкалы времени 1PPS имитатора.

Как видно на схеме, в радиочастотном тракте имитатора присутствуют

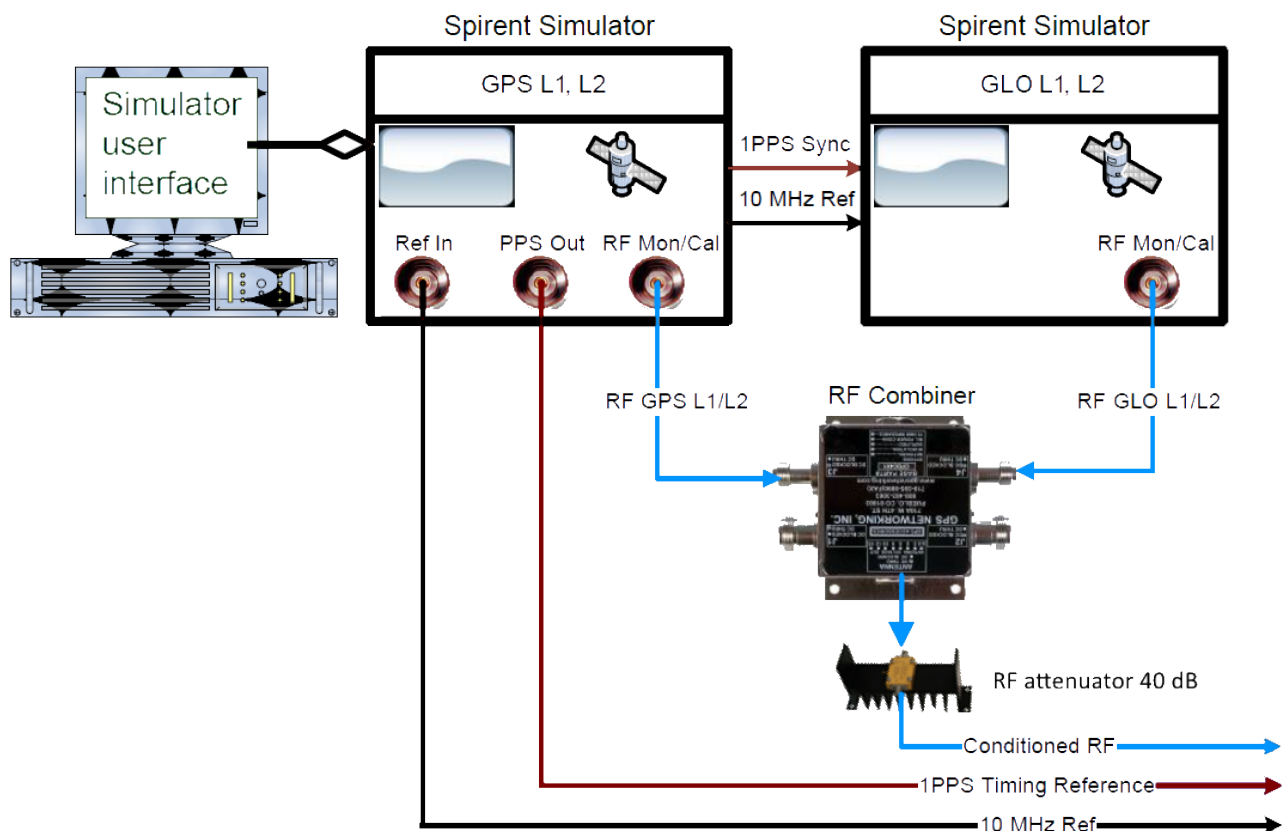


Рис. 2.2 – Структурная схема радиотехнической части имитатора сигналов ГНСС

частотно-зависимые элементы (усилители, смесители сумматоры, аттенюаторы и т.п.). То есть, по аналогии с НАП, время распространения навигационного радиосигнала в тракте зависит от спектральных характеристик сигнала (его центральной частоты и ширины спектра).

2.1.2 Псевдодальность, формируемая имитатором сигналов ГНСС

Для калибровки НАП в первую очередь важна имитируемая псевдодальность, которую имитатор рассчитывает по заложенным в него математическим моделям, а потом формирует как задержку навигационного радиосигнала относительно своей опорной шкалы времени. Таким образом, формируемая псевдодальность – это интервал времени между событием шкалы времени имитатора и соответствующим событием в формируемом сигнале ГНСС. Этот

временной интервал можно выразить следующим образом:

$$T_i = \frac{1}{c}(\rho_i + (T_{\text{НКА},i} - T_{\text{ИМ}}) \cdot c + A_i \cdot c + \Delta_{\text{ИМ},i}), \quad (2.1)$$

где T_i – формируемая псевдодальность до i -го НКА, выраженная как временной интервал между событием шкалы времени имитатора и соответствующим событием в формируемом сигнале ГНСС,

ρ_i – формируемая геометрическая дальность до i -го НКА,

$(T_{\text{НКА},i} - T_{\text{ИМ}})$ – разность шкал времени i -го НКА и шкалы времени имитатора сигналов,

c – скорость света,

A_i – формируемые задержки в атмосфере, релятивистские эффекты и т.д., рассчитываемые по математическим моделям для i -го НКА,

$\Delta_{\text{ИМ},i}$ – погрешность формирования псевдодальности до i -го НКА имитатором сигналов ГНСС, то есть инструментальная погрешность.

Основная причина инструментальной погрешности формирования псевдодальности – групповое время запаздывания сигнала в радиочастотном тракте имитатора сигналов. Это время различно для сигналов на разных частотах в силу наличия частотно-зависимых элементов в радиочастотном тракте. Поскольку в ГНСС ГЛОНАСС применяется частотное разделение навигационных сигналов – сигналы разных НКА излучаются на разных частотах, а следовательно, задерживаются в РЧ тракте по-разному, что приводит к зависимости значения погрешности измерения псевдодальности от рабочей частоты навигационного сигнала. В условиях стабильных параметров внешней среды (в первую очередь температуры), эта составляющая погрешности носит систематический характер, то есть может быть устранена по результатам калибровки.

В данном случае под калибровкой понимается *определение систематической инструментальной погрешности формирования псевдодальности ими-*

таторов сигналов ГНСС. Для решения задачи, поставленной в главе 1, необходимо обеспечить суммарную стандартную неопределённость калибровки u_c не более 0,03 м.

2.2 Существующие методы калибровки имитаторов сигналов ГНСС

Имитаторы сигналов – сложные устройства, и могут быть откалиброваны по многим величинам: мощности формируемого сигнала, частоте опорного генератора, частоте формируемых сигналов и т.д. Здесь и далее под калибровкой понимается именно определение *систематической инструментальной погрешности формирования псевдодальности имитаторов сигналов ГНСС.* Поскольку псевдодальность соответствует задержке сформированного навигационного сигнала относительно шкалы времени имитатора (т.е. интервалу времени), она может быть выражена как в метрах, так и в секундах с коэффициентом пропорциональности равным скорости света.

2.2.1 Метод с применением «опорной НАП»

Метод применяется при серийном выпуске имитаторов многими производителями [60]. Пример схемы измерений показан на рисунке 2.3. Имитатор сигналов синхронизируется по частоте и шкале времени с опорной НАП, формируемые навигационные сигналы подаются на антенный вход НАП, которая производит измерения текущих навигационных параметров по сигналам ГНСС. После записи результатов измерений за некоторый интервал времени производится расчёт разности измеренных НАП значений псевдодальности и значений псевдодальности, полученных с имитатора сигналов.



Рис. 2.3 – Схема измерений при калибровке имитатора сигналов с применением опорной НАП

Характеризуется малыми материальными затратами, но имеет недостаток – фактически оценивается не погрешность формирования псевдодальности, а разность этих погрешностей для калибруемого имитатора и имитатора, с помощью которого был откалиброван опорный приемник сигналов ГНСС. Другими словами, обеспечивается лишь оценка сходимости разных имитаторов сигналов между собой (т.н. «относительная калибровка»). При этом разные производители используют для калибровки разные опорные приёмники сигналов ГНСС, что обуславливает различие систематических погрешностей формирования псевдодальностей между имитаторами сигналов разных производителей. Эта разница может достигать единиц метров и полностью входит в неопределённость калибровки НАП.

2.2.2 Метод с применением осциллографов

Метод в настоящий момент применяется некоторыми производителями и метрологическими лабораториями [48, 61, 62].

Если на имитаторе задать сценарий имитации без учёта атмосферы и прочих эффектов, с неподвижными НКА на нулевом расстоянии от потребителя, без отклонений шкал времени НКА от системной шкалы времени (то есть опорной шкалы времени имитатора), то формула (2.1) примет следующий вид:

$$T_i = \frac{\Delta_{\text{им},i}}{c} = b_{\text{им},i} + \varepsilon, \quad (2.2)$$

где $b_{\text{им},i}$ – систематическая составляющая инструментальной погрешности формирования псевдодальности имитатором сигналов ГНСС для i -го НКА, выраженная как интервал времени;

ε – случайная составляющая инструментальной погрешности формирования псевдодальности, которая принимается как нормально распределённый случайный процесс [3, 63].

Теперь для определения инструментальной погрешности имитатора сигналов достаточно измерить T_i – интервал времени между секундной меткой имитатора сигналов и соответствующим событием в навигационном сигнале. Путём многократных измерений и статистической обработки можно оценить параметры случайной составляющей погрешности и определить величину систематической составляющей инструментальной погрешности формирования псевдодальности имитатором сигналов ГНСС. При этом значение $b_{\text{им}}$ в общем случае будет различным для навигационных сигналов с разной рабочей частотой (сигналы с частотным разделением, сигналы из разных частотных диапазонов ГНСС ГЛОНАСС).

Навигационный радиосигнал системы ГЛОНАСС представляет собой многокомпонентный фазоманипулированный сигнал (на примере сигнала с открытым доступом ГЛОНАСС [57, 2]). Гармонический сигнал модулируется дальномерным кодом, который представляет собой псевдослучайную последовательность (ПСП) из 511 элементов общей длительностью 1 мс. Дополнительно для передачи навигационного сообщения сигнал модулируется двоичной

последовательностью с частотой 50 Гц, при этом в конце каждой строки в кадре навигационного сообщения передаётся код метки времени, представляющий собой укороченную псевдослучайную последовательность из тринадцати символов. Задний фронт последнего символа соответствует окончанию очередного двухсекундного интервала времени от начала суток в шкале времени НКА (далее – БШВ). Следовательно, задний фронт последнего символа ПСП и будет являться событием в навигационном сигнале, соответствующим секундной метке БШВ. Поскольку имитатор настроен на формирование сигналов без моделирования ошибок системы, то БШВ совпадает с системной ШВ, которая соответствует ШВ имитатора.

На рисунке 2.4 графически показана структура навигационного сигнала и показаны фазовые манипуляции несущей частоты, соответствующие фронтам модулирующей последовательности.

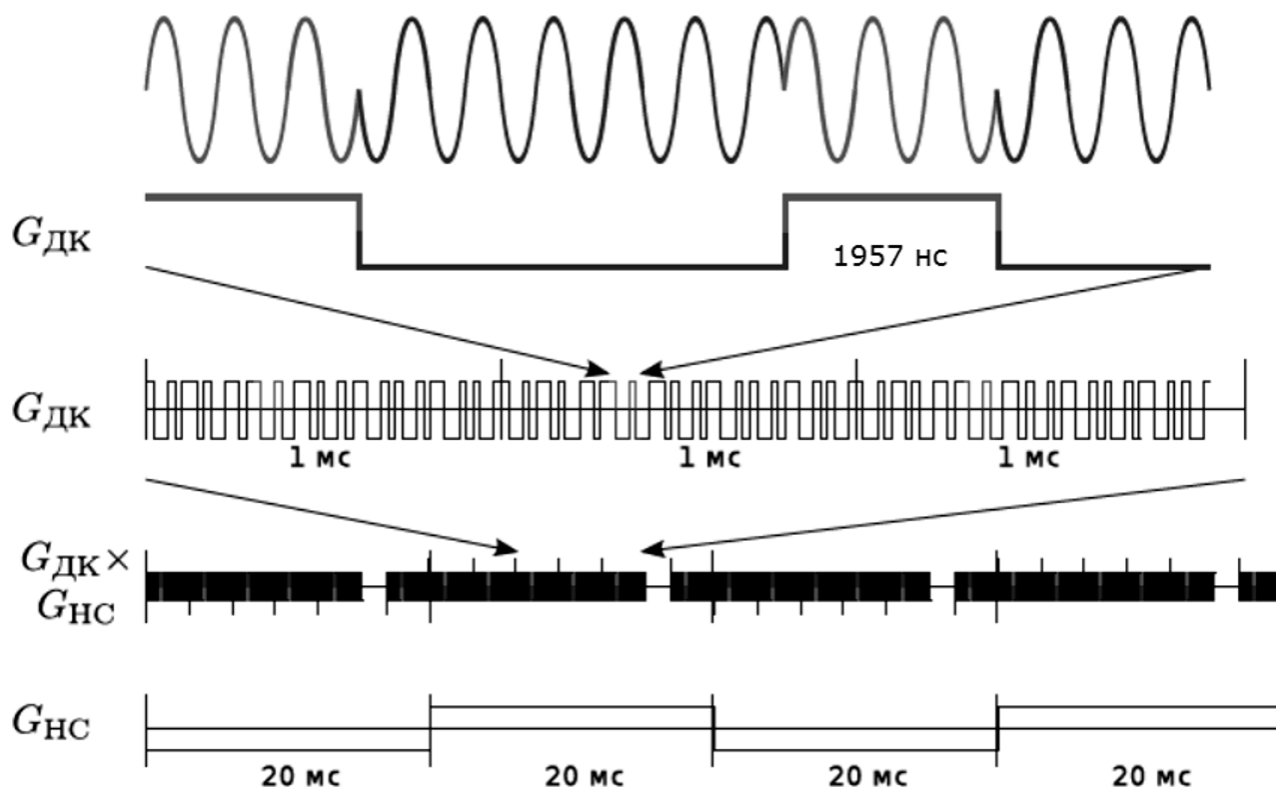


Рис. 2.4 – Графическое представление структуры навигационного сигнала.

$G_{ДК}$ – двоичная последовательность дальномерного кода (М последовательность); $G_{НС}$ – двоичная последовательность навигационного сообщения.

Таким образом, необходимо измерить интервал времени между секундной меткой имитатора сигналов ГНСС и задним фронтом последнего символа ПСП, которая соответствует окончанию строки в кадре навигационного сообщения, как это показано на рисунке 2.5.

Следует обратить внимание на следующие особенности навигационного сигнала, формируемого имитатором сигналов:

1. полученная двоичная последовательность модулирует гармонический сигнал, мощность которого очень мала: минус 160 дБВт на поверхности Земли для сигнала НКА, до минус 90 дБВт для самых мощных серийных имитаторов сигналов ГНСС.
2. измерить этот времени между секундной меткой имитатора сигналов ГНСС и задним фронтом последнего символа ПСП с помощью обычных изме-

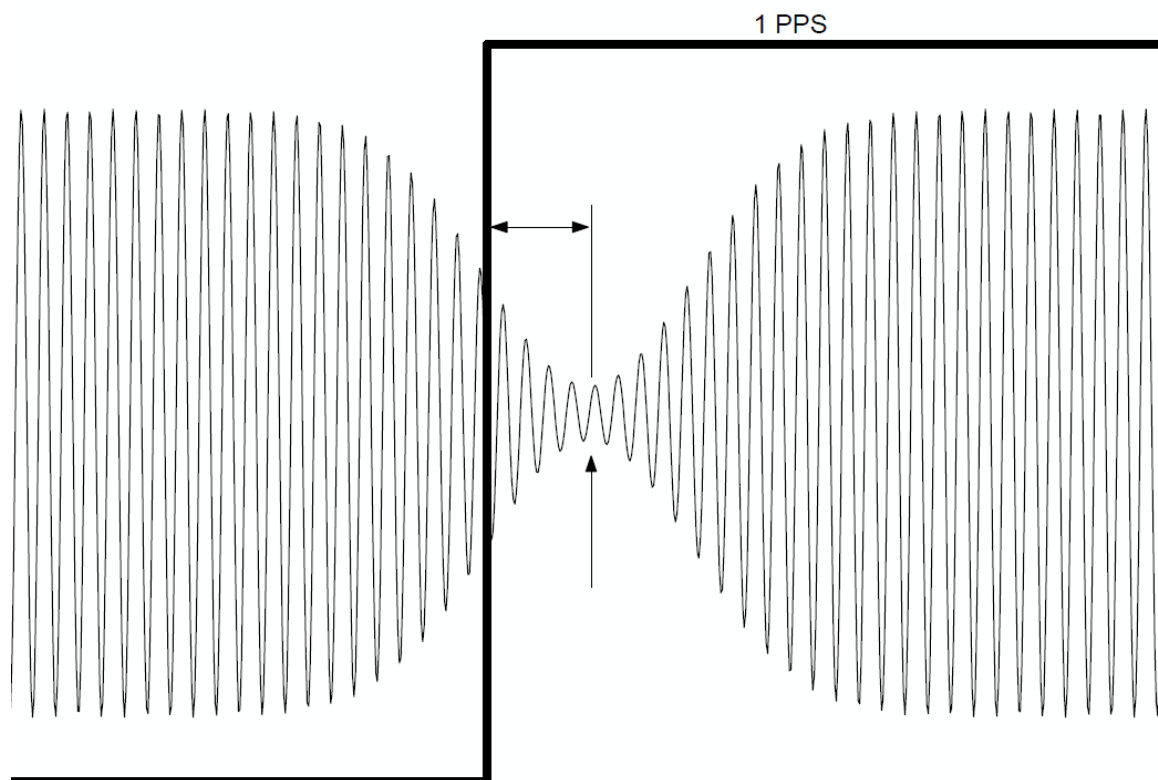


Рис. 2.5 – Измерение интервала времени между секундной меткой шкалы времени имитатора и событием в навигационном сигнале

рителей временных интервалов (электронных частотомеров) невозможно, поскольку искомый фронт не наблюдается в исходном виде, а лишь как фазовый переход несущего гармонического колебания;

3. итоговый сигнал является суммой двух гармонических сигналов одной частоты, но смещённых по фазе на 90° , модулированных последовательно-рядами разной частоты, т.е. применяется квадратурное разделение двух сигналов. В случае ГЛОНАСС на разных квадратурах передаются сигналы с открытым и санкционированным доступом, частота дальномерного кода которых различна [57].

В результате из-за влияния шумов, низкой мощности сигнала, несовершенства модуляторов имитатора сигналов и наличия двух квадратурных составляющих, фазовая манипуляция на экране высокочастотного осциллографа

выглядит как показано на рисунке 2.6. Видно, что фазовая манипуляция оказывается «размазана» по времени, она длится несколько наносекунд, а положение точки перехода через ноль фронта модулирующей последовательности невозможно определить с погрешностью менее 2 нс, при требуемой точности на порядок лучше (необходимо обеспечить суммарную стандартную неопределённость калибровки в части погрешности формирования псевдодальности не более 0,03 м, что соответствует интервалу времени не более 0,1 нс).

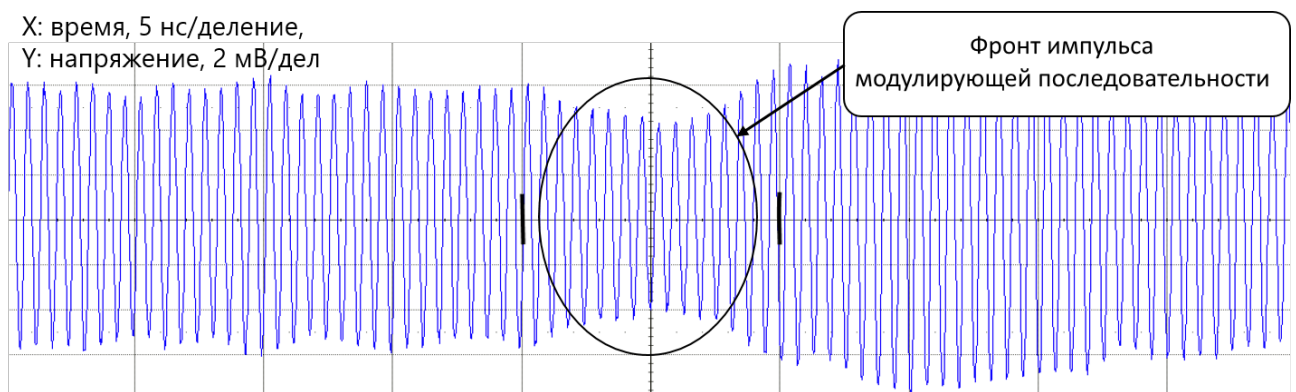


Рис. 2.6 – Навигационный сигнал имитатора сигналов на экране осциллографа.

Таким образом, метод позволяет калибровать имитаторы с прослеживаемостью к первичным эталонам единиц величин, но из-за низкой мощности сигнала и протяженности фронта определить точку перехода фронта импульса модулирующей последовательности через ноль можно с погрешностью не менее 2 нс, что соответствует погрешности воспроизведения псевдодальности не менее 0,6 м. Например, такое предельное значение интервала времени между секундной меткой времени и соответствующим ей событием в навигационном сигнале нормировано для имитаторов сигналов спутниковых навигационных систем GSS9000 производства фирмы Spirent, Великобритания (№ ГРСИ 64105-16).

2.3 Разработка метода калибровки имитаторов сигналов ГЛОНАСС

2.3.1 Предпосылки

Основное препятствие для повышения точности метода с использованием осциллографа – отсутствие возможности зафиксировать момент искомого события - перехода фронта конкретного импульса модулирующей последовательности через ноль. Проблема в том, что осциллограф не позволяет наблюдать сам фронт, а только результат модуляции гармонического сигнала этой двоичной последовательностью, при этом наблюдаемый сигнал содержит посторонние шумы, помехи и квадратурную составляющую.

Ранее была сформулирована задача разработать метод калибровки имитаторов навигационных сигналов ГЛОНАСС в части систематической погрешности формирования псевдодалности с суммарной стандартной неопределённостью u_c не более 0,03 м. То есть необходимо измерить интервал времени между секундной меткой шкалы времени имитатора и точкой перехода фронта конкретного импульса модулирующей последовательности через ноль с погрешностью не более 0,1 нс.

Один из вариантов решения задачи – демодуляция сформированного навигационного сигнала, при этом демодуляция не должна существенно искажать положение точки перехода фронта через ноль.

Чтобы снизить влияние неравномерности ГВЗ в тракте измерительного устройства, предлагается использовать аналого-цифровое преобразование на навигационной частоте. В качестве аналого-цифрового преобразователя следует использовать высокочастотный цифровой осциллограф, что позволит обеспечить прослеживаемость результатов измерений к первичным эталонам единиц величин в соответствии с действующей поверочной схемой ГОСТ Р 8.761-2011 [64].

Калибровка сводится к измерению интервала времени, то есть погрешность измерений осциллографа прямо зависит от погрешности опорного гене-

ратора частоты. Следовательно, для повышения точности целесообразно применять внешний источник опорной частоты, характеристики которого заведомо выше характеристик опорного генератора осциллографа.

2.3.2 Описание метода калибровки имитаторов сигналов ГЛОНАСС

Алгоритм измерений содержит следующие основные этапы:

1. Сборка схемы измерений и предварительные измерения.
2. Запись осциллографом сигнала, формируемого имитатором.
3. Определение начальной фазы и частоты несущего гармонического колебания.
4. Демодуляция записанной выборки с разделением квадратурных составляющих навигационного сигнала.
5. Определение точки перехода фронта модулирующей последовательности через ноль.

Схема измерений показана на рисунке 2.7. Формируемый имитатором навигационный радиосигнал и секундная метка шкалы времени подаются на разные каналы осциллографа. Имитатор сигналов и осциллограф используют в качестве опорной частоты сигналы внешнего высокостабильного стандарта частоты. Записанная осциллографом измерительная информация передаётся на внешнюю ПЭВМ для постобработки.

Предварительно следует измерить групповое время запаздывания в соединительных кабелях «RF» и «1PPS» (τ_{RF1} и τ_{1PPS}) на соответствующих частотах с помощью векторного анализатора цепей и измерителя временных интервалов соответственно [65, 66]. Кабели при постоянной температуре практически не проявляют частотную зависимость [14].

Отдельно следует измерить ГВЗ в тракте имитатора от выхода большой мощности до рабочего выхода (см. схему 2.2) τ_{RF2} с помощью векторного анализатора цепей [14, 65]. Это ГВЗ индивидуально для каждой рабочей частоты формируемых навигационных сигналов, поскольку в тракте присутствуют

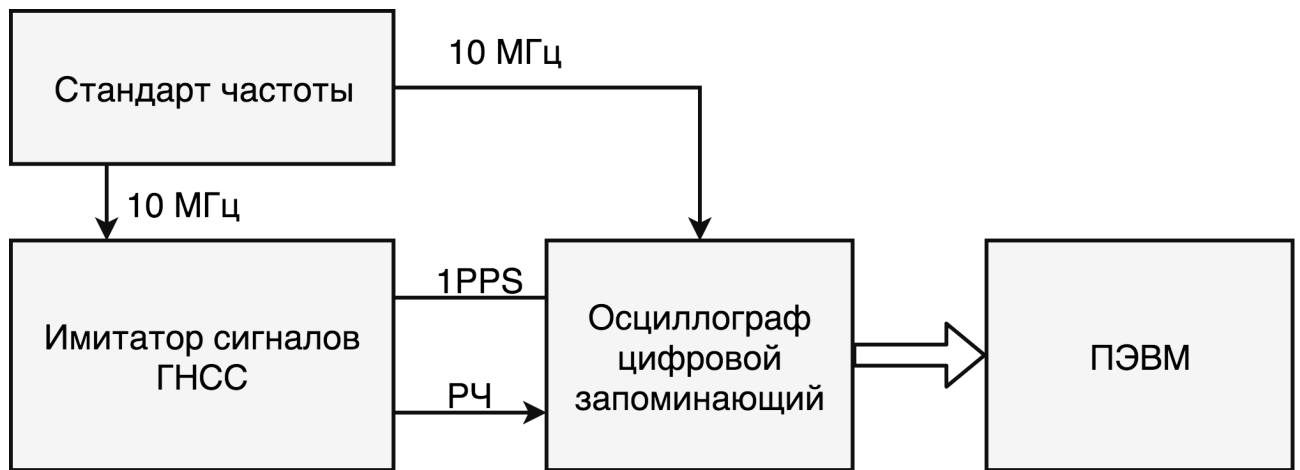


Рис. 2.7 – Схема проведения измерений. 1PPS -- сигнал секундной метки шкалы времени имитатора сигналов; RF – навигационный сигнал, формируемый имитатором

частотно-зависимые элементы (аттенюаторы).

Имитатор настраивается на формирование навигационного сигнала одного НКА без моделирования эффектов атмосферы и пр., с неподвижными НКА на нулевом расстоянии от потребителя, без отклонений шкал времени НКА от системной шкалы времени. Мощность сигнала должна быть не ниже минус 90 дБ (исх. 1 Вт), что ограничивает перечень потенциально калибруемых имитаторов.

Осциллограф используется в качестве АЦП с последующей передачей массива данных – результатов оцифровки входных сигналов – на внешнюю ПЭВМ для постобработки. Параметры настройки:

- триггер срабатывания - уровень 1 В сигнала 1PPS. Этот уровень стандартно используется в большинстве метрологических лабораторий [26, 28, 23].
- центр выборки смещён от момента триггера так, чтобы в записываемый интервал заведомо попал задний фронт импульса, соответствующего последнему символу строки навигационного сообщения.
- частота аналого-цифрового преобразования не ниже 40 Гвыб/с. Такая частота дискретизации позволяет снизить погрешность отсчёта до пренебрежимо малого уровня [67].

- длительность выборки не ниже 20 мкс. Необходимо обрабатывать одновременно несколько фронтов, чтобы снизить случайную погрешность и нивелировать ошибку из-за дискретизации формирователя двоичной последовательности имитатора [68].
- работа от внешнего источника опорной частоты. Для обеспечения стабильности и точности измерений внешний генератор должен быть заведомо стабильнее опорного генератора осциллографа и имитатора, а его относительная погрешность по частоте прямо повлияет на погрешность измерений интервала времени [69].

Записанный осциллографом массив оцифрованного навигационного радиосигнала имитатора сигналов передаётся в качестве входного аргумента в специальное программное обеспечение, с помощью которого и проводится последующая обработка. Алгоритм реализован на языке программирования MatLab.

Модель записанного навигационного сигнала в дискретном виде описывается уравнением [2],[57]:

$$S[k] = A_I[k] \cdot \sin(2\pi f_0 + \varphi_0) + A_Q[k] \cdot \cos(2\pi f_0 + \varphi_0), \quad (2.3)$$

где A_I – модулирующая двоичная последовательность синфазной составляющей навигационного сигнала,

A_Q – модулирующая двоичная последовательность квадратурной составляющей навигационного сигнала,

f_0 и φ_0 – частота несущей и начальная фаза записанного сигнала.

Для примера рассматривается выборка частотой 40 Гвыб/с длительностью 20 мкс. Дискретную последовательность (одномерный массив) с осциллографа, соответствующую записанному сигналу, обозначим как $S = S[k], k = 1..800000$. Соответствующую записанному сигналу дискретную последовательность моментов времени (одномерный массив) обозначим как $T = T[k], k = 1..800000$.

Введём опорный сигнал $S_{ref}[k] = \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{nom} \cdot T[k])$, где f_{nom} – номинальная частота несущего гармонического колебания навигационного сигнала. Опорный сигнал выражается также в дискретной форме с частотой дискретизации, равной частоте дискретизации осциллографа.

Фаза несущей частоты записанного сигнала определяется для корректного разделения квадратур. Фаза записанного сигнала относительно опорного определяется по формуле [70]:

$$\varphi[n] = \arcsin \left(4 \cdot \frac{\overline{\hat{S} \cdot \hat{S}_{ref}}}{|\hat{S}| \cdot \pi} \right) \quad (2.4)$$

где $\hat{S} = S[k], k = (n - m)..(n + m)$,

$\hat{S}_{ref} = S_{ref}[k], k = (n - m)..(n + m)$,

$|\hat{S}|$ – среднее значение массива $|\hat{S}|$,

$\overline{\hat{S} \cdot \hat{S}_{ref}}$ – среднее значение поэлементного произведения массивов \hat{S} и \hat{S}_{ref} , m – длина «окна осреднения», которая выбирается таким образом, чтобы в окно попадало не менее 40 циклов несущего гармонического колебания.

В результате вычислений определяется массив $\varphi = \varphi[k], k = 1..800000$, который содержит разность фаз записанного и опорного сигнала в каждый момент времени. Типичный график зависимости φ от времени показан на рис. 2.8. На рисунке выделены провалы амплитуды и соответствующие им фазовые манипуляции.

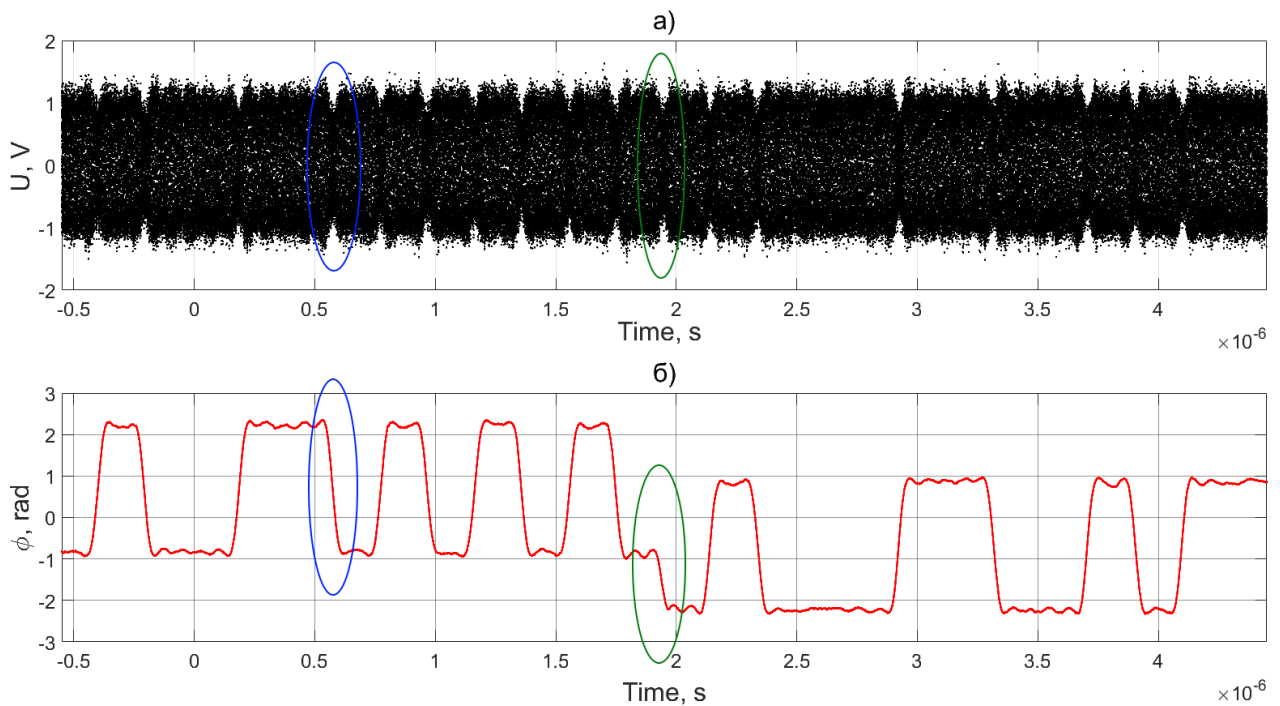


Рис. 2.8 – а) Записанный радиосигнал; б) Фаза записанного сигнала

На графике фазы записанного сигнала устранён линейный тренд, обусловленный расхождением частот опорного и записанного сигнала.

Отчетливо видны фазовые манипуляции, соответствующие модуляции записанного сигнала двоичными последовательностями синфазной (показаны зелёным цветом) и квадратурной составляющих (показаны синим цветом) .

Полученная зависимость позволяет определить начальную фазу несущей частоты записанного навигационного сигнала φ_0 как локальный экстремум функции распределения плотности вероятности, найденной методом непараметрического сглаживания [71].

Первая производная полученной зависимости пропорциональна разности частот записанного и опорного сигналов, что позволяет определить частоту несущей записанного сигнала:

$$f_0 = f_{nom} + \frac{1}{N} \sum_{k=2}^N \frac{\varphi[k] - \varphi[k-1]}{2\pi} \quad (2.5)$$

Для разделения квадратур формируются массивы, соответствующие син-

фазному и квадратурному опорному гармоническому сигналу по следующим формулам:

$$S_I[k] = \sin(2\pi f_0 T[k] + \varphi_0), \quad (2.6)$$

$$S_Q[k] = \cos(2\pi f_0 T[k] + \varphi_0), \quad (2.7)$$

, где f_0 и φ_0 – частота несущей и начальная фаза записанного сигнала.

В результате умножения записанного сигнала (уравнение 2.3) и синфазного опорного 2.6 получается дискретная последовательность $\tilde{S}_I[k]$, которая содержит двоичную модулирующую последовательность $A_I[k]$ и сигнал на удвоенной частоте несущей f_0 .

Для устранения высокочастотной составляющей традиционно применяются фильтры низких частот [72]. Однако классические фильтры имеют нелинейную ФЧХ, что приведёт к изменению наклона фронта импульса модулирующей последовательности и сместит положение перехода через ноль. Это неизбежно приведёт к увеличению погрешности метода, поэтому для подавления высокочастотной составляющей следует использовать либо сглаживающий фильтр МНК 1-го порядка (вещественная передаточная функция, линейная ФЧХ фильтра), либо пользоваться рекурсивным фильтром и обрабатывать сигнал в прямом и обратном направлении [73, 74]. Сглаживающий фильтр МНК требует меньше вычислительных ресурсов, поэтому он был реализован.

Результирующая последовательность определяется по формуле 2.8:

$$\check{S}_I[k] = \frac{1}{2N+1} \sum_{k=-N}^N \tilde{S}_I[k], \quad (2.8)$$

где N – ширина окна сглаживания, определяется в функциональной зависимости от соотношения сигнал/шум записанного сигнала (то есть из уровня мощности выходного сигнала имитатора сигналов). При апробации использована

ширина окна, соответствующая длительности 40 циклов несущего гармонического колебания исходного навигационного сигнала.

Результаты фильтрации показаны на рисунке 2.9. На графике а) показан записанный навигационный сигнал (увеличенный фрагмент с фазовой манипуляцией), на б) синим показана синфазная составляющая демодулированного сигнала, красным – после фильтрации. На графике в) показан увеличенный фрагмент фильтрованного сигнала, с точкой перехода фронта импульса модулирующей последовательности через ноль.

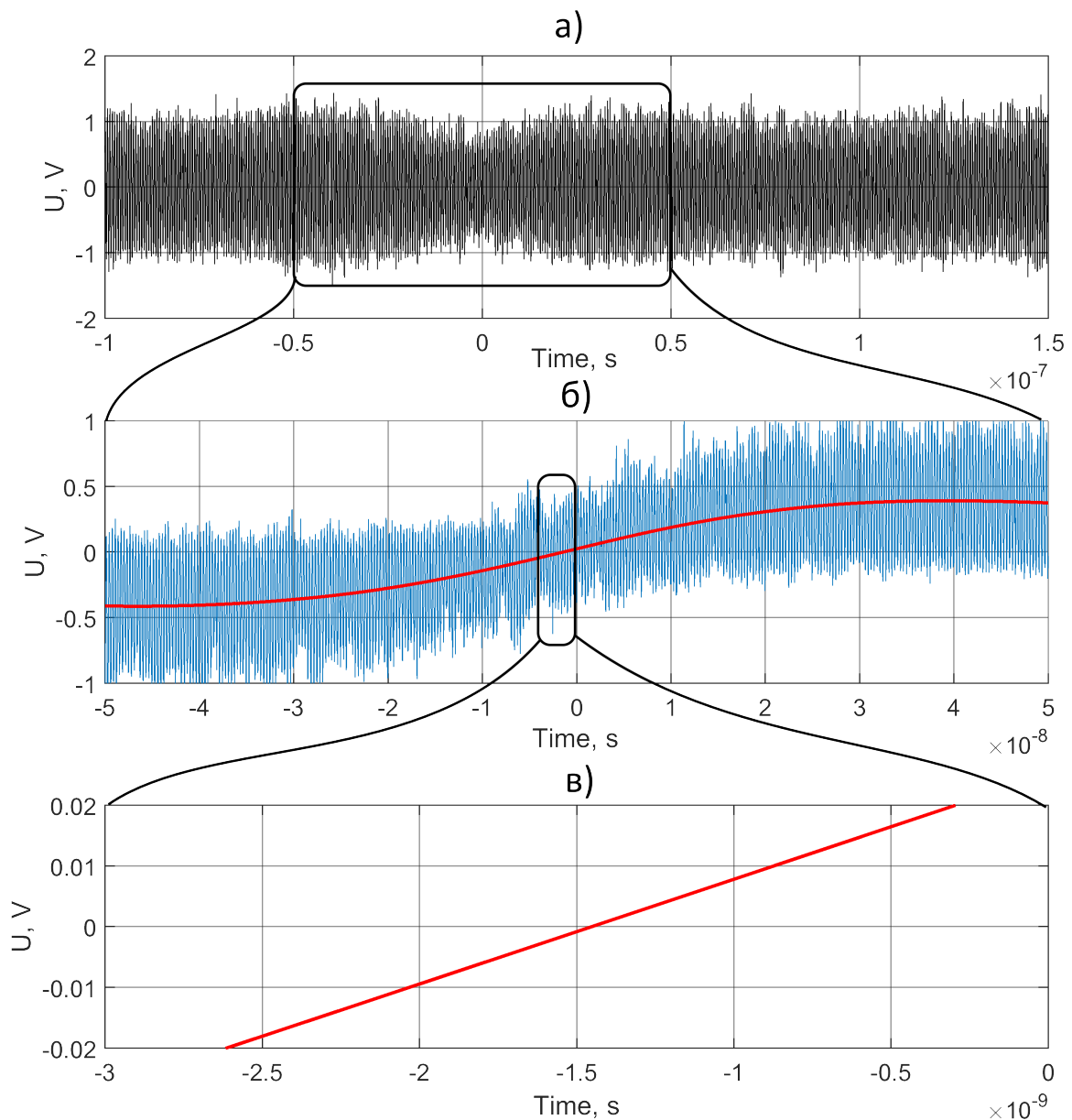


Рис. 2.9 – Результаты работы алгоритма демодуляции: а) записанный навигационный сигнал; б) синфазный демодулированный сигнал; в) перехода фронта импульса модулирующей последовательности через ноль

Отдельно проводятся расчёты для квадратурной составляющей навигационного сигнала. Для этого записанный сигнал 2.3 умножается на квадратурный опорный сигнал 2.7, дальнейшие действия аналогичны, как для синфазной составляющей.

В результате фильтрации получаем сглаженные двоичные модулирующие последовательности синфазной и квадратурной составляющих исходного сиг-

нала, по которым ведётся поиск перехода фронта модулирующей последовательности через ноль (по признаку смены знака). Результат поиска показан на рисунке 2.10, точки переходов подписаны соответствующим временем в наносекундах.

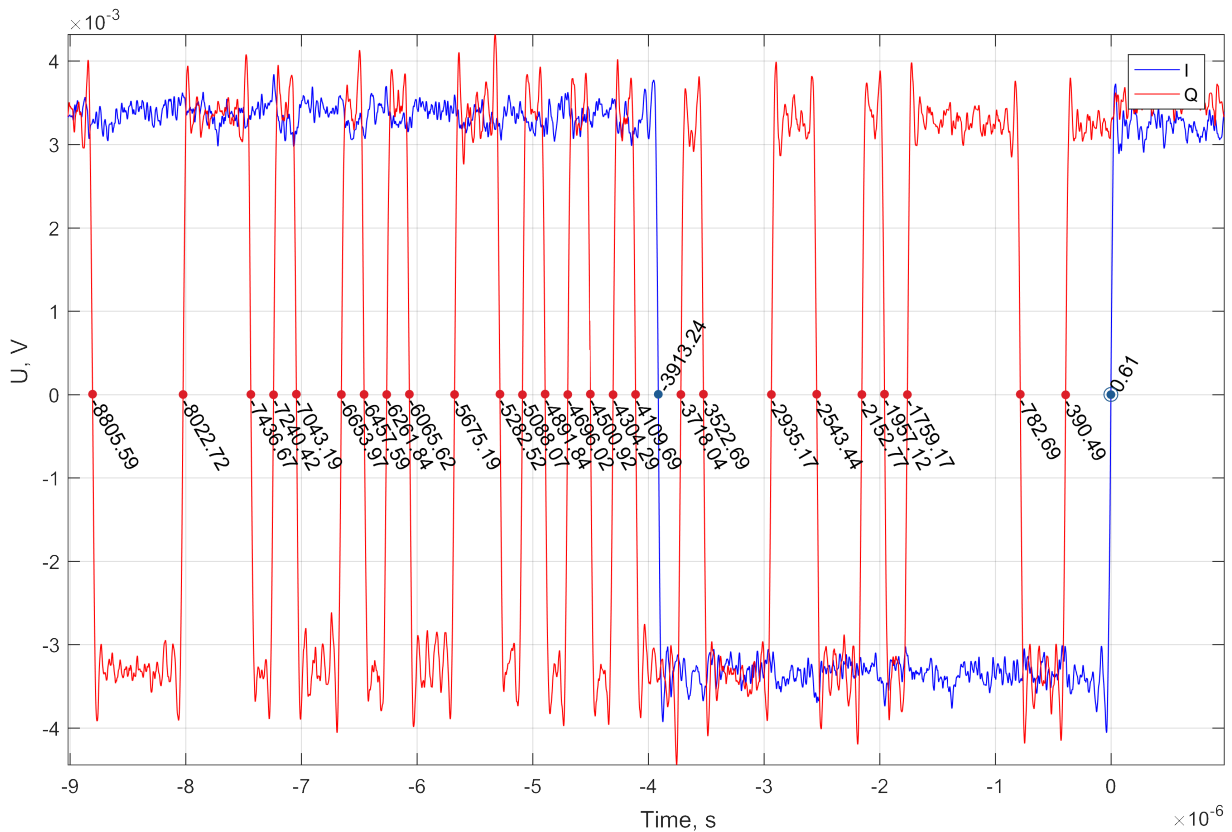


Рис. 2.10 – Результаты поиска переходов.

Таким образом, показано, что теперь появилась возможность определить момент перехода фронта модулирующей последовательности через ноль с точностью до половины цены деления (то есть половины периода дискретизации осциллографа). Остальные составляющие погрешности метода, не связанные с погрешностью отсчета, рассмотрены далее.

Определение момента перехода позволяет измерить интервал времени между секундной меткой имитатора сигналов (она соответствует нулю шкалы времени записанного массива сигнала) и соответствующим моментов в навигационном сигнале τ_{IM} .

С учётом задержек во всех кабелях, статистической обработки, формулы

2.2 систематическая инструментальная погрешность формирования псевдодальности имитатором сигналов ГЛОНАСС определяется по формуле:

$$b_{\text{ИМ},i} = \frac{c}{N} \sum_{j=1}^N (T_i[j] - (\tau_{RF1} + \tau_{RF2,i}) + \tau_{1PPS}), \quad (2.9)$$

где $b_{\text{ИМ},i}$ – систематическая составляющая инструментальной погрешности формирования псевдодальности имитатором сигналов для i -го НКА;

$T_i[j]$ – интервал времени между секундной меткой шкалы времени имитатора и соответствующим событием в навигационном сигнале i -го НКА, измеренный осциллографом, j -й замер,

τ_{RF1} – задержка в кабеле RF,

$\tau_{RF2,i}$ – задержка в тракте имитатора от выхода большой мощности до рабочего выхода для i -го НКА,

τ_{1PPS} – задержка в кабеле 1PPS.

2.3.3 Технические требования для реализации метода калибровки

Из описания метода и схемы измерений следует, что реализации метода должны соблюдаться следующие условия:

1. выходная мощность калибруемого имитатора сигналов должна быть не менее минус 90 дБ (исх. 1 Вт);
2. возможность работы имитатора от сигналов внешнего источника опорной частоты;
3. наличие выхода секундной метки шкалы времени имитатора;
4. возможность формирования имитатором сигнала одного НКА с нулевой псевдодальностью и доплеровским смещением частоты;
5. необходимо обеспечить поддержание постоянства температуры окружающего воздуха в пределах $20 \pm 1^\circ\text{C}$;
6. частота дискретизации осциллографа не ниже 40 ГГц;
7. полоса пропускания осциллографа не ниже 20 ГГц;

8. количество каналов осциллографа не менее 2-х;
9. возможность работы осциллографа от сигналов внешнего источника опорной частоты.

2.3.4 Бюджет неопределённости калибровки

В соответствии с описанием метода используются следующие измерительные средства:

1. Векторный анализатор цепей для измерения задержек в кабеле и радиочастотном тракте имитатора.
2. Измеритель временных интервалов для измерения задержек.
3. Осциллограф цифровой высокочастотный.
4. Внешний высокостабильный стандарт частоты.

При отработке метода использованы анализатор электрических цепей векторный ZVA24, частотомер 53230A, осциллограф цифровой запоминающий LeCroy 820 Zi-A и государственный первичный эталон времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2012.

Следовательно, в соответствии с [75] и моделью измерений 2.9 суммарная стандартная неопределённость калибровки определяется по формуле:

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{u_{VNA}}{c}\right)^2 + \left(\frac{u_{UT}}{c}\right)^2 + \left(\frac{u_{OSC}}{c}\right)^2 + \left(\frac{u_O}{c}\right)^2 + \left(\frac{u_A}{c}\right)^2}, \quad (2.10)$$

где u_{VNA} – стандартная неопределённость измерения ГВЗ в кабеле RF с помощью векторного анализатора цепей;

u_{UT} – стандартная неопределённость измерения задержки в кабеле 1PPS с помощью измерителя временных интервалов;

u_{OSC} – стандартная неопределённость измерения временных интервалов осциллографом;

u_O – стандартная неопределённость измерения из-за погрешности отсчёта [67];

u_A – стандартная неопределённость, обусловленная случайными величинами, оценённая по типу A.

В соответствии с документацией производителя Rohde&Schwarz для ZVA24, неопределённость измерения ГВЗ в исследуемой цепи для диапазона частот навигационных сигналов не превышает 0,08 нс [14, 65, 76].

Согласно описанию типа средства измерений на частотомер 53230A (№ ГРСИ 51077-12 [77]), стандартная неопределённость измерения интервалов времени не превышает 0,02 нс.

Стандартная неопределённость измерения интервалов времени осциллографом обусловлена несколькими причинами: инструментальная погрешность осциллографа, погрешность частоты опорного генератора и неравномерность ГВЗ в разных каналах осциллографа.

Инструментальная погрешность измерений интервалов времени осциллографом в соответствии с описанием типа (№ ГРСИ 49277-12 [77]) не превышает 0,05 нс.

Погрешность частоты опорного генератора осциллографа за счёт использования сигналов от ГЭТ 1-2012 с относительной погрешностью частоты не более $\pm 5 \cdot 10^{-15}$ при величине измеряемого интервала не более 10 мкс вносит пренебрежимо малый вклад в погрешность измерения интервалов времени осциллографом, не более 0,001 нс.

Неравномерность ГВЗ в разных каналах осциллографа может быть устранена за счёт компенсирующих измерений (прежняя схема измерений, только входные каналы осциллографа RF и 1PPS меняются местами) с точностью до половины периода дискретизации 0,0125 нс (при частоте дискретизации 40 ГГц). Вносимая погрешность измерений интервалов времени также не превышает 0,0125 нс, при этом имеет равномерный характер распределения.

Вклад случайной погрешности измерений оценивается как стандартная неопределённость типа A u_A по результатам измерений. В первую очередь случайная погрешность измерений обусловлена квантованием по уровню, по-

мехами в тракте, температурным шумом и т.п. Из-за наличия температурной зависимости и несовершенства аппаратуры поддержания внешних условий, процесс измерений в общем случае нестационарен, а потому не может быть усреднён. Однако, серия из 100 измерений проводится не более чем за 2 минуты, что позволяет считать процесс измерений стационарным на этом интервале (влияние температурного дрейфа за 2 минуты несущественно в нормальных лабораторных условиях). Для 100 измерений стандартная неопределённость по типу А не превышает 0,02 нс.

Также вклад вносит погрешность отсчёта, равная половине периода дискретизации 0,0125 нс. Имеет равномерный характер распределения.

Бюджет неопределённости калибровки имитаторов сигналов ГЛОНАСС в части систематической составляющей инструментальной погрешности формирования псевдодальности как интервала времени приведён в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Бюджет неопределённости калибровки имитатора сигналов ГЛОНАСС

Источник неопределённости	Тип	Значение входной величины	Вероятностное распределение	Делитель	Коэффициент чувствительности	Значение неопределённости, м
Погрешность измерения ГВЗ в соединительных кабелях	B	0,08 нс	Нормальное	1	c	0,024
Погрешность измерения измерителя временных интервалов	B	0,02 нс	Нормальное	1	c	0,006
Неравномерность ГВЗ в разных каналах осциллографа	B	0,0125 нс	Равномерное	$\sqrt{3}$	c	0,002
Разность опорных частот имитатора и осциллографа	B	0,001 нс	Нормальное	1	c	0,0003

Таблица 2.1. Бюджет неопределённости калибровки имитатора сигналов ГЛОНАСС

Источник неопределённости	Тип	Значение входной величины	Вероятностное распределение	Делитель	Коэффициент чувствительности	Значение неопределённости
Инструментальная погрешность измерений временных интервалов осциллографом	B	0,05	Нормальное	1	c	0,015
Погрешность отсчета	A	0,0125	Равномерное	$\sqrt{3}$	c	0,002
Случайная погрешность	A	0,02	Нормальное	1	c	0,006
Стандартная неопределённость						0,03

c – скорость света, $c = 299792458$ м/с (точно)

В соответствии с расчётом, суммарная стандартная неопределённость калибровки имитаторов сигналов ГЛОНАСС в части систематической погрешности формирования псевдодальности не превышает 0,03 м.

2.3.5 Температурная зависимость результатов калибровки

Температурная зависимость оценивалась экспериментально, путём проведения измерений в условиях изменявшейся температуры окружающей среды. В качестве калибруемого имитатора использован GSS8000, Spirent, Великобритания. На рисунке 2.11 показаны результаты калибровки при изменении температуры от 15°C до 25°C и обратно до 21°C.

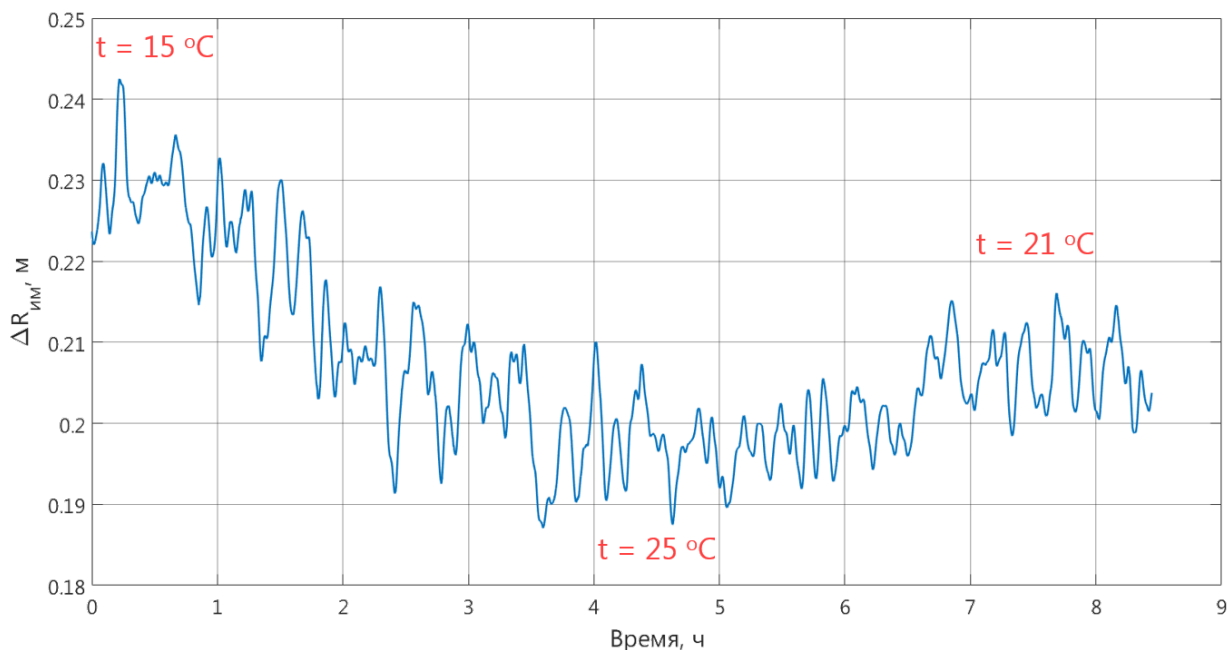


Рис. 2.11 – Температурная зависимость результатов калибровки

Таким образом, погрешность калибровки при изменении температуры даже в пределах нормальных лабораторных условий может достигать 0,03 м. Поэтому необходима обеспечить работу измерительной установки в диапазоне температур не более $\pm 1^{\circ}\text{C}$, что позволит снизить влияние температурной зависимости до уровня, которым можно пренебречь. Альтернативным решением может стать учёт поправок на температуру внешней среды.

2.4 Выводы

1. Разработан метод калибровки имитаторов навигационного сигнала ГЛОНАСС в части систематической погрешности формирования псевдодалности. В отличие от применяемого в настоящее время метода калибровки по минимуму амплитуды навигационного сигнала, основывается на использовании многоканального высокочастотного аналого-цифрового преобразования с последующей демодуляцией оцифрованного сигнала с целью выделения квадратурных составляющих и фильтрацией.
2. Для разработанного метода достигнута суммарная стандартная неопределённость калибровки имитаторов в части систематической погрешности

формирования псевдодальности не более 0,03 м с прослеживаемостью результатов калибровки к первичным эталонам единиц величин. Метод удовлетворяет требованиям схемы передачи единицы времени от ГПЭ к НАП при измерении задержки навигационных сигналов, описанной в разделе 1.4.

3. Для разработанного метода установлены ограничения:

- 3.1 выходная мощность калибруемого имитатора сигналов должна быть не менее минус 90 дБ (исх. 1 Вт);
- 3.2 возможность работы имитатора от сигналов внешнего источника опорной частоты;
- 3.3 наличие выхода секундной метки шкалы времени имитатора;
- 3.4 возможность формирования имитатором сигнала одного НКА с нулевой псевдодальностью и доплеровским смещением частоты;
- 3.5 необходимо обеспечить поддержание постоянства температуры окружающего воздуха в пределах $20 \pm 1^\circ\text{C}$;
- 3.6 частота дискретизации АЦП не ниже 40 ГГц;
- 3.7 полоса пропускания АЦП не ниже 20 ГГц;
- 3.8 количество каналов АЦП не менее 2-х;
- 3.9 возможность работы АЦП от сигналов внешнего источника опорной частоты.

3 Метод калибровки навигационной аппаратуры потребителей системы ГЛОНАСС в части систематической инструментальной погрешности измерений псевдодальности

3.1 Основные принципы работы и описание конструкции НАП

3.1.1 Общее описание

Навигационная аппаратура потребителей ГНСС предназначена для определения координат местоположения, вектора скорости, времени потребителя в результате приема радиосигналов, излучаемых навигационными спутниками, измерения их параметров и решения навигационной задачи.

Подавляющее большинство современных образцов НАП сочетают аналоговую и цифровую обработку сигналов. На рисунке 3.1 показана упрощённая структурная схема НАП [2, 3], которая включает антенну, радиочастотный блок, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифровой вычислитель.

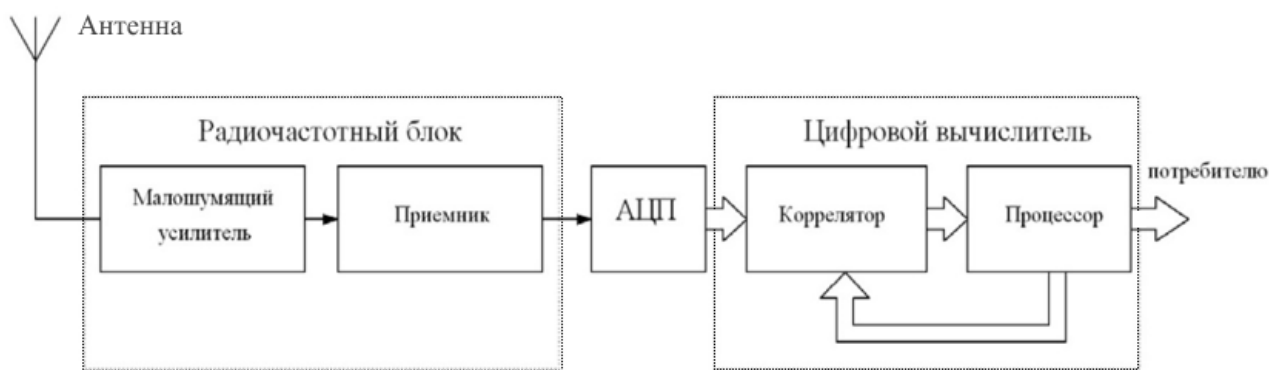


Рис. 3.1 – Структурная схема НАП

Антенна преобразует электромагнитные волны в электрический сигнал, и сама по себе может содержать полосовой фильтр и малошумящий усилитель.

Радиочастотный блок предназначен для фильтрации принятых сигналов по частоте для борьбы с шумами, усиления, понижения несущей частоты принятых сигналов для дальнейшей обработки на промежуточной частоте.

Аналого-цифровой преобразователь трансформирует аналоговый сигнал в цифровой для последующей обработки в цифровом вычислителе.

Цифровой вычислитель решает задачу извлечения навигационной информации из принятых радиосигналов, а также измеряет радионавигационные параметры сигнала.

Синхронизация всех компонентов обеспечивается с помощью опорного генератора, который синтезирует необходимый набор гармонических колебаний и синхросигналов для работы радиочастотного блока, АЦП и вычислителя; формирует шкалу времени НАП.

На этапе первичной обработки сигналов в цифровом вычислителе осуществляется:

- формирование опорных сигналов дальномерного кода;
- корреляционная обработка принятых радионавигационных сигналов;
- поиск навигационных сигналов по задержке и частоте;
- слежение за фазой дальномерного кода, частотой сигналов, фазой несущей и формирование оценок псевдодальности, псевдоскорости и псевдофазы;
- демодуляция навигационных сообщений, передаваемых в навигационных сигналах;

На этапе вторичной обработки проводится решение навигационной задачи – определение вектора состояния потребителя (координаты, скорость, время) на основе результатов измерений и извлеченной из навигационных сообщений информации о местоположении НКА и их шкале времени.

3.1.2 Измеряемые параметры

Измеряемый параметр сигнала называют радионавигационным параметром, соответствующий ему геометрический параметр – навигационным. Так, задержка дальномерного кода соответствует дальности, доплеровское смещение частоты – радиальной скорости, фаза несущей частоты – псевдофазе [78].

Псевдодальность – это дальность, измеренная беззапросным методом, то

есть НКА излучает сигнал в бортовой шкале времени, а НАП принимает его в своей шкале времени и вычисляет дальность по времени его распространения. Приставка «псевдо-» появляется из-за того, что шкалы времени НКА и НАП в общем случае несинхронны и измеренная псевдодальность содержит разность их шкал времени.

Аналогичная ситуация со скоростью, которая при измерении НАП содержит разность частот НКА и НАП, поэтому называется псевдоскоростью.

Координаты и время потребителя определяются в результате решения навигационной задачи псевдодальномерным методом, который использует следующую функциональную связь:

$$R_i = \sqrt{(x_{\text{НКА}_i} - x_{\text{НАП}})^2 + (y_{\text{НКА}_i} - y_{\text{НАП}})^2 + (z_{\text{НКА}_i} - z_{\text{НАП}})^2} + c \cdot \Delta t_i, \quad (3.1)$$

где $x_{\text{НКА}_i}, y_{\text{НКА}_i}, z_{\text{НКА}_i}$ – координаты i -го НКА, рассчитанные на основе передаваемой эфемеридной информации,

$x_{\text{НКА}_i}, y_{\text{НКА}_i}, z_{\text{НКА}_i}$ – координаты потребителя,

Δt_i – расхождение шкалы времени потребителя и системной шкалы времени ГЛОНАСС в предположении, что бортовые шкалы времени НКА синхронны между собой,

c – скорость света.

Из формулы следует вывод, что точность оценки координат и времени потребителя явно зависит от точности измерения псевдодальности.

3.1.3 Погрешность измерения псевдодальности и анализ существующих методов калибровки

Полная модель измерений псевдодальности НАП часто записывается в виде формулы [3]:

$$R_{k,m}(j) = \rho_k(j) + (T_k(j) - T(j)) \cdot c + K_{k,m}(j) + I_{k,m}(j) + Tr_{k,m}(j) + b_{k,m} + \varepsilon(j), \quad (3.2)$$

где $R_{k,m}(j)$ – измерения псевдодальности по m -му типу виду сигналов k -го НКА, в j -й момент времени,

$j = 1..N$ – номер эпохи измерений из N эпох,

ρ_k – геометрическая дальность между фазовыми центрами антенн НАП и k -го НКА,

$T_k(j) - T(j)$ – разность шкал времени k -го НКА и НАП,

$I_{k,m}(j)$ – задержка m -го типа навигационных сигналов k -го НКА в ионосфере,

$Tr_{k,m}(j)$ – задержка m -го типа навигационных сигналов k -го НКА в тропосфере,

$K_{k,m}(j)$ – составляющая, связанная с движением k -го НКА за время распространения сигнала до НАП, определяется как $K_{k,m} = D_{k,m} \cdot \lambda_{k,m} \cdot R_{k,m}/c$ ($D_{k,m} \cdot \lambda_{k,m}$ – произведение доплеровского смещения частоты и длины волны m -го типа навигационных сигналов k -го НКА, т.н. псевдоскорость); упоминается редко, поскольку при решении навигационной задачи эта составляющая не учитывается,

$b_{k,m}$ – систематическая инструментальная погрешность измерения псевдодальности НАП по m -му типу виду сигналов k -го НКА,

$\varepsilon(j)$ – шум измерений, принимается случайной величиной с нормальным законом распределения и нулевым математическим ожиданием [3, 63].

Составляющие погрешности измерения псевдодальности и их влияние на погрешность решения навигационной задачи подробно рассмотрены ранее в разделе 1.1.

В результате анализа показано, что для достижения потенциальной точности решения навигационной задачи НАП ГЛОНАСС, необходимо обеспечить калибровку в части систематической погрешности измерений псевдодальности с суммарной стандартной неопределённостью u_c не более 0,1 м. При этом калибровка должна осуществляться без прерывания штатной эксплуатации НАП.

Здесь и далее под калибровкой НАП понимается оценка систематических

составляющих инструментальной погрешности измерений псевдодальности (беззапросной дальности).

Как показано выше в главе 1 существующая в РФ эталонная и методическая база не обеспечивают калибровку НАП с требуемой точностью, поэтому предложена схема прослеживаемости НАП в части систематической погрешности измерений псевдодальности. Для калибровки НАП без прерывания штатной эксплуатации НАП предложен метод дифференциальной калибровки, обладающий следующими важными преимуществами:

- калибровка проводится по реальному сигналу;
- метод не требует прерывания работы калибруемой НАП в случае, если это стационарная постоянно действующая НАП.

Точность калибровки дифференциальным методом прямо зависит от точности калибровки опорной НАП. Для достижения требуемой неопределённости калибровки дифференциальным методом, необходимо откалибровать опорную НАП в целом с суммарной стандартной неопределённостью u_c не более 0,06 м.

Для решения этой задачи в работе [79] предложен метод непосредственной калибровки НАП. Метод основан на полунатурном методе калибровки по первичным навигационным параметрам (псевдодальность, псевдоскорость и т.д.) с применением имитаторов сигналов ГЛОНАСС. Применение имитаторов обеспечивает наивысшие характеристики повторяемости результатов, поскольку калибровка может проводиться по идеальному сигналу без помех, при этом радионавигационные параметры сигнала хорошо известны. Метод имеет три существенных недостатка:

1. Точность метода определяется точностью калибровки самих имитаторов.
2. Невозможно калибровать НАП в целом вместе с АФУ.
3. Имитатор формирует искусственный навигационный сигнал, который может существенно отличаться от реального.

Первый недостаток устраняется с применением метода калибровки ими-

таторов, обеспечивающий прослеживаемость результатов к первичным эталонам единиц величин, предложенного ранее в главе 2.

Для устранения второго недостатка предлагается проводить калибровку составных частей НАП (приемно-измерительного устройства, антенны, антенного кабеля) и вычислять суммарные калибровочные поправки всего комплекта для каждой литеры рабочей частоты ГЛОНАСС в каждом частотном диапазоне для сигналов с открытым и санкционированным доступом.

Третий недостаток может привести к тому, что систематические погрешности измерений псевдодальности при работе по имитированному сигналу будут существенно отличаться от систематических погрешностей при работе по реальному сигналу. Результаты калибровки могут оказаться некорректны. Для решения этой проблемы необходимо провести верификацию метода непосредственной калибровки.

3.2 Разработка метода непосредственной калибровки НАП

3.2.1 Описание метода

Как было показано, измеренная псевдодальность имеет систематическую погрешность, значение которой зависит от рабочей частоты навигационного сигнала и обусловлено частотной зависимостью ГВЗ в радиочастотном тракте НАП. Радиочастотный тракт можно разделить на две основные составляющие: антенно-фидерное устройство (АФУ) с кабелем и тракт приёмно-измерительного устройства (ПИУ). Очевидно, что каждый компонент вносит свой вклад в общую задержку распространения навигационного радиосигнала, а, следовательно, и в систематическую погрешность измерений псевдодальности. Таким образом, калибровку НАП в части систематической инструментальной погрешности измерения псевдодальности можно свести к калибровке отдельных составных частей с последующим вычислением суммарных калибровочных поправок всего комплекта НАП.

Калибровка АФУ заключается в измерении ГВЗ в тракте антенны ГНСС для разных значений рабочих частот, разных углов места и азимута. Измерения проводятся с помощью специально разработанного комплекса аппаратуры для измерения параметров антенно-фидерных устройств (КИП АФУ)[47]. Для этого в состав комплекса входит эталон единицы группового времени запаздывания в антеннах навигационной аппаратуры потребителя в диапазоне частот от 1,1 ГГц до 1,7 ГГц, который прослеживается к первичному специальному эталону единиц длины ГЭТ 199-2018 и первичному эталону единицы волнового сопротивления в коаксиальных волноводах ГЭТ 75-2011.

Метод калибровки приёмно-измерительного устройства основан на полунатурном моделировании навигационного сигнала с применением имитаторов сигналов ГНСС, которые выступают в качестве источников эталонного навигационного сигнала. Схема измерений показана на рисунке 3.2.

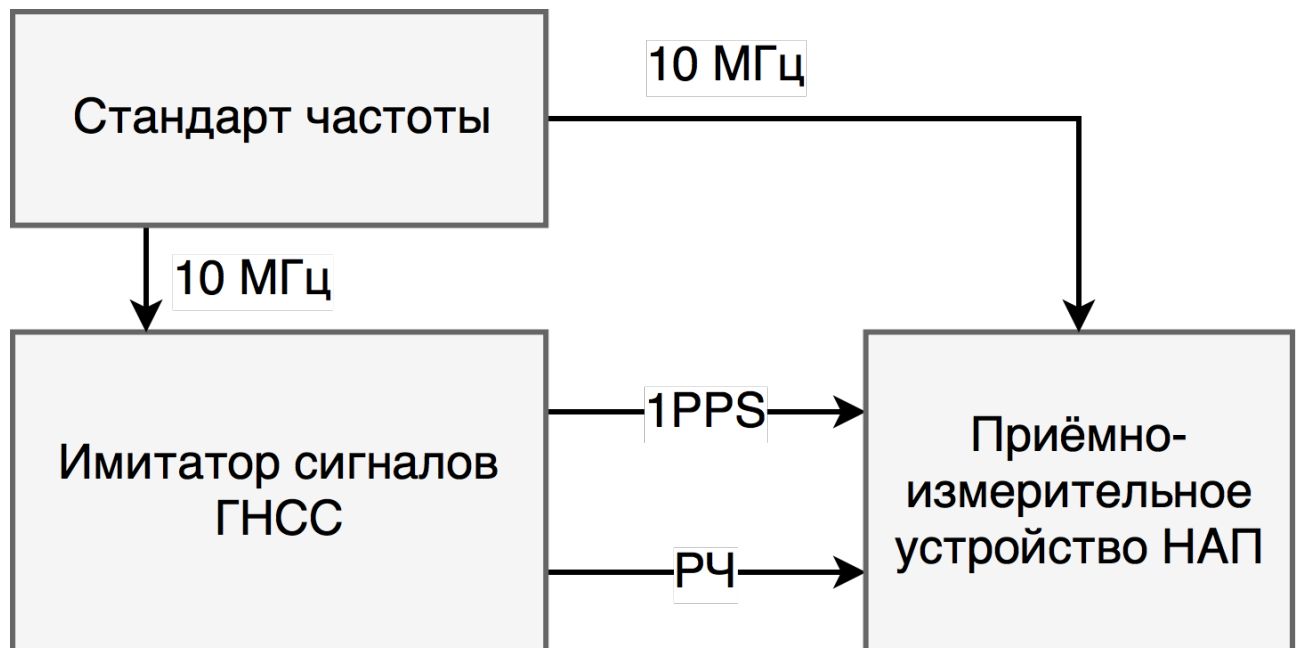


Рис. 3.2 – Схема калибровки приёмно-измерительного устройства НАП

Как показано на схеме, имитатор и приёмное устройство используют общую опорную частоту и их шкалы времени синхронизированы. То есть шкала времени (ШВ) имитатора является одновременно и ШВ системы и ШВ потребителя. Это позволяет устранить составляющую псевдодальности, обу-

словленную разностью этих шкал времени и обуславливает требования к конструкции и функциональным возможностям НАП.

На имитаторе задаётся формирование сценария навигационной обстановки со следующими параметрами:

- модель движения – твёрдая точка;
- формируются все сигналы, которые может принимать калибруемый образец НАП, и для которых по результатам калибровки определено значение систематической погрешности формирования псевдодальности имитатором сигналов;
- формирование атмосферных эффектов отключено;
- формирование погрешностей эфемеридно-временного обеспечения отключено.

Модель формируемой псевдодальности – это частный случай полной модели псевдодальности (3.2). Таким образом, при учёте схемы измерений и условий формирования навигационной обстановки, модель формируемой псевдодальности на каждый момент времени имеет следующий вид:

$$R_{И,k,m}(j) = \rho_k(j) + b_{k,m} + \varepsilon_{И}, \quad (3.3)$$

$j = \overline{1..N}$ – номер эпохи, на которую получены измерения,

$R_{И,k,m}(j)$ – формируемая псевдодальность для m -го типа сигналов k -го НКА,

$\rho_{И,k,m}(j)$ – формируемая геометрическая дальность до k -го НКА,

$b_{И,k,m}(j)$ – систематическая составляющая инструментальной погрешности формирования имитатором псевдодальности для m -го типа сигналов k -го НКА, выраженная в метрах,

$\varepsilon_{И}$ – случайная составляющая погрешности формирования псевдодальности, нормально распределённый случайный процесс.

В свою очередь, псевдодальность, измеренная приёмно-измерительным ус-

тройством (ПИУ) по сигналам имитатора, будет описываться так:

$$R_{\text{ПИУ},i}(j) = \rho_k(j) + b_{\text{И},i} + \varepsilon_{\text{И}} + b_{\text{НАП},i} + \varepsilon_{\text{НАП}}, \quad (3.4)$$

где $R_{\text{ПИУ},k,m}(j)$ – измеренная приёмно-измерительным устройством псевдодальность для m -го типа сигналов k -го НКА,

$b_{\text{ПИУ},k,m}$ – систематическая инструментальная погрешность измерений псевдодальности приёмно-измерительным устройством для m -го типа сигналов k -го НКА, выраженная в метрах,

$\varepsilon_{\text{ПИУ}}$ – случайная составляющая погрешности измерения псевдодальности, нормально распределённый случайный процесс.

Измерения проводятся на интервале не менее суток, чтобы обеспечить измерения по всем НКА. Для оценки стабильности $b_{\text{ПИУ},i}$ измерения необходимо проводить на восьмисуточном интервале, поскольку за этот срок спутниковая группировка ГНСС ГЛОНАСС полностью повторится [2].

Разница измерений псевдодальности приёмным устройством и эталонных данных с имитатора в соответствии с формулами (3.3), (3.4) будет описываться следующим выражением:

$$\begin{aligned} R_{\text{ПИУ},k,m}(j) - R_{\text{И},k,m}(j) &= \\ &= \rho_k(j) + b_{\text{ПИУ},k,m} + \varepsilon_{\text{ПИУ}} - (\rho_k(j) + b_{\text{И},k,m} + \varepsilon_{\text{И}}) = \\ &= -b_{\text{И},k,m} + b_{\text{ПИУ},k,m} + \varepsilon_{\Sigma}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

где ε_{Σ} – суммарная случайная погрешность псевдодальности имитатора и приёмно-измерительного устройства. Нормально распределённый случайный процесс.

Шум измерений ε_{Σ} устраняется с помощью статистической обработки [80]. Тогда значение $b_{\text{ПИУ},i}$ можно найти по формуле:

$$b_{\text{ПИУ},k,m} = b_{\text{И},k,m} + \sum_{j=1}^N (R_{\text{ПИУ},k,m}(j) - R_{\text{И},k,m}(j)), \quad (3.6)$$

Как показано выше, систематическая инструментальная погрешность НАП обусловлена суммарной задержкой распространения навигационного сигнала в тракте антенно-фидерного устройства и приёмно-измерительного устройства. Таким образом, систематическая инструментальная погрешность НАП в целом определяется следующим выражением:

$$b_{\text{НАП},k,m} = b_{\text{АФУ},k,m} \cdot c + b_{\text{ПИУ},k,m} = b_{\text{АФУ},k,m} \cdot c + b_{\text{И},k,m} + \sum_{j=1}^N (R_{\text{ПИУ},k,m}(j) - R_{\text{И},k,m}(j)), \quad (3.7)$$

где c – скорость света,

$b_{\text{АФУ},k,m}$ – задержка распространения для m -го типа сигналов k -го НКА в тракте АФУ, умноженная на скорость света,

$b_{\text{И},k,m}$ – систематическая инструментальная погрешность формирования псевдодальности имитатором сигналов ГНСС, метод оценки которой приведён в гл. 2.3.2.

Систематическая инструментальная погрешность измерений псевдодальности НАП определяется для всех НКА. Поскольку инструментальная погрешность обусловлена частотной зависимостью в тракте НАП, значения погрешности для НКА с одинаковой литерой рабочей частоты будут практически одинаковы. По результатам калибровки рассчитываются калибровочные поправки к измерениям псевдодальности для четырёх типов сигналов (с открытым и санкционированным доступом в частотных диапазонах L1 и L2) для 14 литер рабочей частоты, то есть всего 56 калибровочных поправок.

На рисунке 3.3 показаны типовые графики разности измерений псевдодальности приёмно-измерительным устройством и эталонных данных с имитатора согласно формуле 3.5 на суточном интервале, полученные в результате апробации метода. Для апробации в качестве имитатора использован имитатор сигналов GSS8000 производства фирмы Spirent, Великобритания. Калибровке подвергалась прецизионная НАП SIGMA, производства Javad, США.

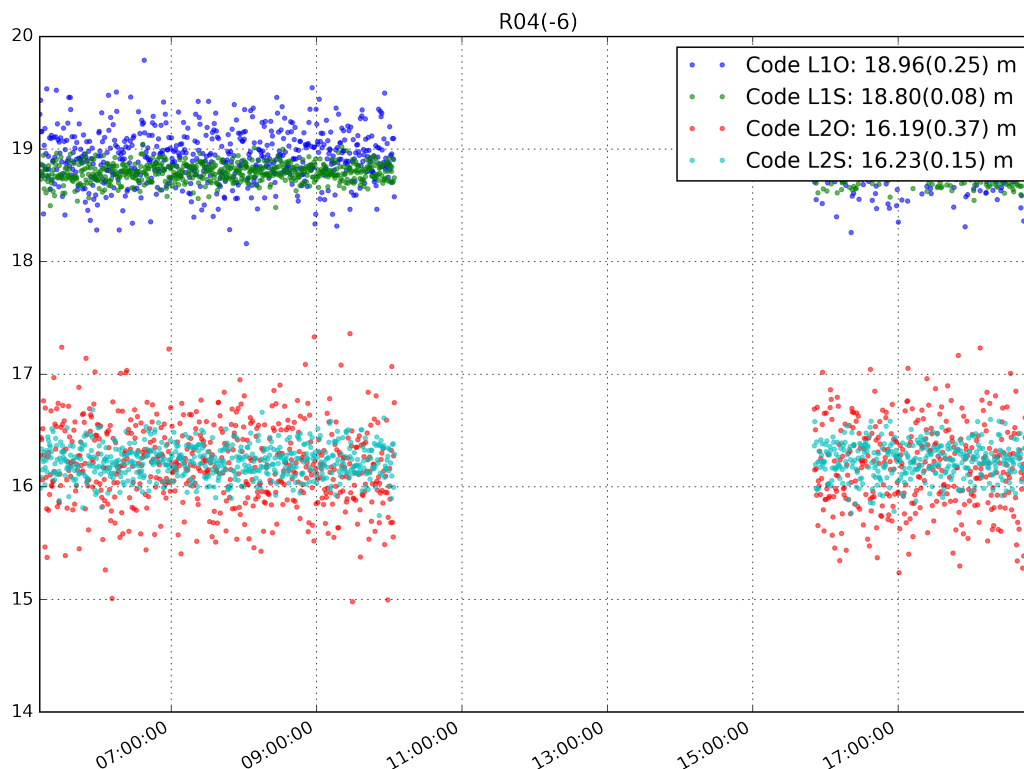


Рис. 3.3 – График разности измеренной НАП псевдодальности и эталонных данных имитатора

Пустые промежутки соответствуют периодам, когда НКА отсутствовал в зоне видимости.

В таблице 3.1 показаны результаты калибровки НАП, таблица визуально показана на графике 3.4. Видно, что разброс значений инструментальной погрешности измерений псевдодальности для всех сигналов ГЛОНАСС достигает трёх метров. В то же время для GPS разброс значений калибровочных поправок существенно ниже, не более тридцати сантиметров.

Таблица 3.1. Результаты калибровки НАП SIGMA

Литера рабочей частоты	L1O	L1S	L2O	L2S
-7	0,428	0,561	-2,015	-1,992
-6	0,762	0,601	-2,008	-1,966
-5	0,760	0,583	-1,765	-1,963
-4	0,405	0,489	-1,981	-1,964
-3	0,330	0,371	-1,869	-1,977
-2	0,636	0,275	-2,238	-1,948
-1	0,120	0,149	-1,897	-1,976
0	0,000	0,020	-1,946	-2,011
1	0,039	-0,079	-2,154	-2,077
2	0,081	-0,154	-2,182	-2,123
3	-0,279	-0,251	-2,148	-2,208
4	-0,276	-0,314	-2,239	-2,279
5	-0,142	-0,422	-2,370	-2,390
6	-0,477	-0,530	-2,294	-2,504
GPS	-1,067	-1,080	-1,328	-1,254



Рис. 3.4 – Результаты калибровки НАП SIGMA

3.2.2 Требования к НАП

Для применения метода калибруемая НАП должна обладать следующими функциональными возможностями:

1. работа от внешнего источника опорной частоты;
2. работа от внешнего источника шкалы времени, либо выход секундной метки собственной шкалы времени;
3. выдача потребителю результатов измерений первичных навигационных параметров;
4. конструкция должна обеспечивать разборку НАП на составные части: антенно-фидерное устройство и приёмно-измерительное устройство.

Для учёта результатов калибровки НАП должна поддерживать возможность задавать калибровочные поправки отдельно по каждому типу сигналов для

каждой литеры рабочей частоты во всех частотных диапазонах системы ГЛО-НАСС. Также результаты калибровки может учитывать потребитель, самостоятельно выполняя вторичную обработку результатов измерений.

3.2.3 Бюджет неопределённости калибровки

В соответствии с [75] и моделью измерений 3.7 суммарная стандартная неопределённость калибровки определяется по формуле:

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{u_{\text{АФУ}}}{c}\right)^2 + u_{\text{ИМ}}^2 + u_{\text{О}}^2 + u_{\text{А}}^2}, \quad (3.8)$$

где $u_{\text{АФУ}}$ – стандартная неопределённость измерения из-за погрешности определения ГВЗ в АФУ НАП;

$u_{\text{ИМ}}$ – стандартная неопределённость калибровки имитаторов в части систематической погрешности формирования псевдодальности;

$u_{\text{А}}$ – стандартная неопределённость, обусловленная случайными величинами, оценённая по типу А.

Измерения группового времени запаздывания АФУ НАП проводятся с помощью государственного эталона единицы группового времени запаздывания в антеннах НАП (№ 3.1.ZZT.0211.2016). Согласно паспорту эталона, доверительные границы (при доверительной вероятности 0,95) погрешности измерения группового времени запаздывания в антенне не более $\pm 0,2$ нс.

Стандартная неопределённость калибровки имитаторов в части систематической погрешности формирования псевдодальности рассчитана ранее (раздел 2.3.4), суммарная стандартная неопределённость не превышает 0,03 м.

Стандартная неопределённость, обусловленная случайными величинами, оценена как стандартное отклонение математического ожидания по результатам калибровки на суточном интервале. На суточном интервале при дискретности измерений 30 с проводятся не менее 720 измерений.

Таблица 3.2. Бюджет неопределённости непосредственной калибровки НАП

Источник неопределённости	Тип	Значение входной величины	Вероятностное распределение	Делитель	Коэффициент чувствительности	Значение неопределённости, м
Неопределённость калибровки АФУ НАП в части ГВЗ	B	0,2 нс	Нормальное	2	c	0.03
Систематическая погрешность формирования псевдодальности имитатора сигналов	B	0,03 м	Нормальное	1	1	0.03
Случайная погрешность измерения псевдодальности НАП	A	0,03 м	Нормальное	1	1	0.03
Суммарная стандартная неопределённость						0.06
Расширенная неопределённость (k=2)						0.12

Суммарная стандартная неопределённость калибровки имитаторов сигналов ГНСС в части систематической погрешности формирования псевдодальности не превышает 0,03 м.

3.3 Дифференциальный метод калибровки НАП

Дифференциальный метод калибровки давно известен и широко применяется производителями НАП и различными лабораториями, которые занимаются обработкой измерительной информации различных сетей НАП в интересах геофизики, геодезии, сейсмологии и т.п. Метод реализуется в нескольких вариантах относительно опорной НАП, относительно виртуальной «средней по сети» НАП. Позволяет проводить калибровку НАП практически в глобальном масштабе, за исключением изолированных регионов типа Антарктиды, поскольку для корректных результатов необходимо, чтобы калибруемая НАП

имела общие участки видимости НКА с опорной НАП (с другими приёмниками сети в случае сетевого решения).

Для калибровки НАП на месте эксплуатации относительно эталонной НАП, откалиброванной методом непосредственной калибровки, предложена реализация метода, применяемая Международным бюро мер и весов (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM), представленная в публикациях [24],[27].

Также с помощью дифференциальной калибровки, проведена верификация предложенного в главе 3.2 метода непосредственной калибровки. Для этого сравнивались результаты оценки систематических измерений псевдодальности обоими методами.

3.3.1 Описание метода

Схема измерений показана на рисунке 3.5.

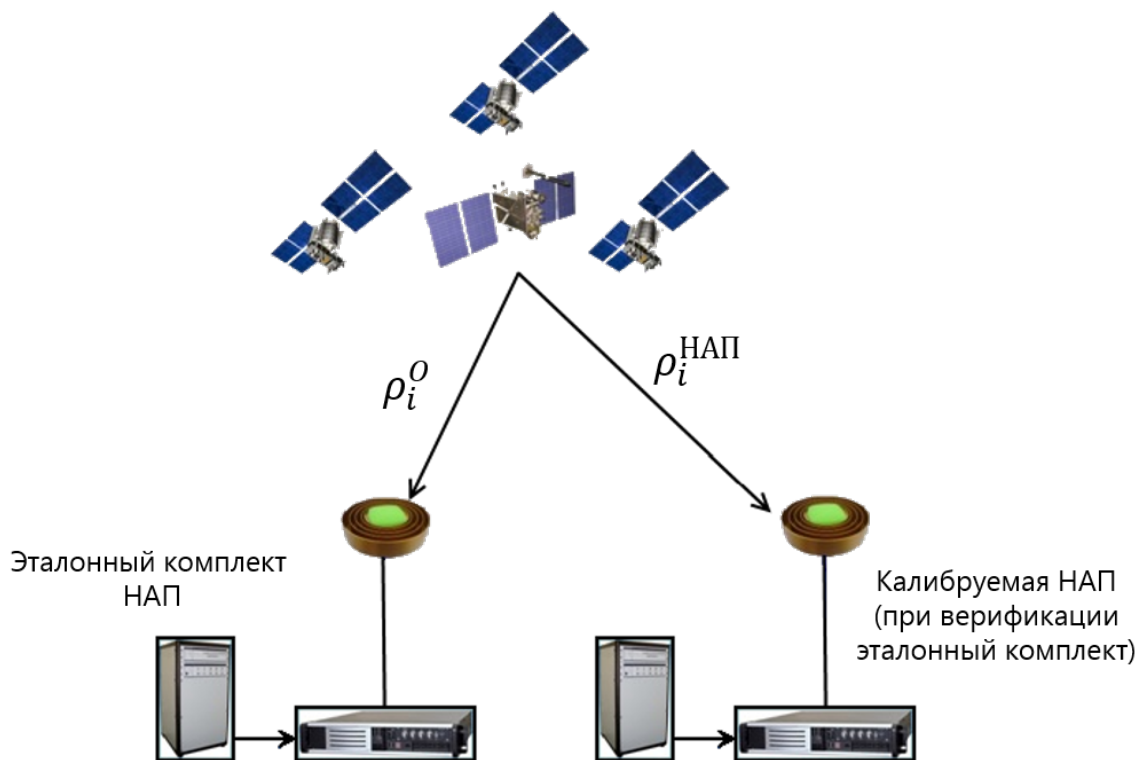


Рис. 3.5 – Схема измерений при дифференциальной калибровке НАП

Опорная (эталонная) и калибруемая НАП проводят измерений текущих навигационных параметров (псевдодальности, псевдоскорости, псевдофазы и

т.д.) с дискретностью 30 секунд. При этом оба комплекта НАП используют сигналы внешних высокостабильных водородных стандартов частоты в качестве опорных. Для обеспечения измерений по всем НКА системы ГЛОНАСС, измерения проводятся на интервале не менее суток [57].

Полная модель измерений псевдодальности НАП описывается формулой 3.2, соответственно модель псевдодальности, измеренной опорной НАП, выглядит следующим образом:

$$R_{O,k,m}(j) = \rho_{O,k}(j) + (T_k(j) - T_O(j)) \cdot c + K_{O,k,m}(j) + I_{O,k,m}(j) + \\ + Tr_{O,k,m}(j) + b_{O,k,m} + \varepsilon_O[j], \quad (3.9)$$

где $R_{O,k,m}(j)$ – измерения псевдодальности опорной НАП по m -му типу виду сигналов k -го НКА, в j -й момент времени,

$T_k(j) - T_O(j)$ – разность шкал времени k -го НКА и опорной НАП,

$b_{O,k,m}$ – систематическая инструментальная погрешность измерения псевдодальности опорной НАП по m -му типу виду сигналов k -го НКА,

Для калибруемой НАП аналогично:

$$R_{H,k,m}(j) = \rho_{H,k}(j) + (T_i(j) - T_H(j)) \cdot c + K_{H,k,m}(j) + \\ + I_{H,k,m}(j) + Tr_{H,k,m}(j) + b_{H,k,m} + \varepsilon_H[j], \quad (3.10)$$

Первая разность измерений псевдодальности опорной и калибруемой НАП по одному и тому же НКА описывается формулой:

$$R_{O,k,m}(j) - R_{H,k,m}(j) = \rho_{O,k}(j) - \rho_{H,k}(j) + (T_k(j) - T_O(j)) \cdot c - \\ - (T_k(j) - T_H(j)) \cdot c + \varepsilon_\Sigma[j] + K_{O,k,m}(j) - K_{H,k,m}(j) + \\ + I_{O,k,m}(j) - I_{H,k,m}(j) + Tr_{O,k,m}(j) - Tr_{H,k,m}(j) + b_{O,k,m} - b_{H,k,m}, \quad (3.11)$$

где $\varepsilon_\Sigma[j]$ – суммарный шум измерений калибруемой и опорной НАП, случайна величина с нормальным законом распределения и нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной сумме дисперсий ε_O и ε_H .

При дистанции между калибруемой и опорной НАП менее 1 км можно принять следующие допущения:

1. параметры ионосферы и тропосферы можно считать одинаковыми;
2. мала погрешность определения $\rho_{O,i}(j) - \rho_{H,i}(j)$, обусловленная ошибками эфемеридного обеспечения.

Второе утверждение требует дополнительного пояснения. Ошибка эфемерид – медленно меняющийся пространственный вектор. Проекция этого вектора на линию визирования и есть погрешность определения геометрической дальности $\Delta\rho$. Поскольку углы линии визирования для обеих НАП отличаются незначительно, на единицы угловых секунд, то и погрешность определения геометрической дальности для обеих НАП можно считать практически одинаковой. Следовательно, впоследствии можно рассматривать $\rho_{O,i}(j) - \rho_{H,i}(j)$ как разность геометрических дальностей, определённых в соответствии с эфемеридами из навигационного сообщения, пренебрегая погрешностью этого определения.

При учёте допущений уравнение 3.11 преобразуется:

$$R_{H,k,m}(j) - R_{O,k,m}(j) = \rho_{H,k}(j) - \rho_{O,k}(j) + (T_O(j) - T_H(j)) \cdot c + \\ + K_{H,k,m}(j) - K_{O,k,m}(j) + b_{H,k,m} - b_{O,k,m} + \varepsilon_{\Sigma}[j] \quad (3.12)$$

Заменим выражение $(T_O(j) - T_H(j))$ на $\Delta T(j)$ – разность шкал времени опорной и калибруемой НАП. Если обе НАП используют в качестве опорного генератора водородные стандарты частоты, то $\Delta T(j)$ будет прямо зависеть от номера эпохи j с коэффициентом пропорциональности равным относительной разности частот опорных стандартов частоты[81]:

$$\Delta T(j) = T(0) + \Delta F \cdot j \cdot dT \quad (3.13)$$

где $T(0)$ – разность шкал на начальный момент времени;

j – номер эпохи измерений,

dT – длительность эпохи,

ΔF – относительная разность опорных частот обеих НАП.

С учётом (3.13) преобразуем уравнение (3.12), переместив все неизвестные составляющие в правую часть.

$$R_{H,k,m}(j) - R_{O,k,m}(j) - \rho_{H,k}(j) + \rho_{O,k}(j) - \Delta T(j) \cdot c - \\ - K_{H,k,m}(j) + K_{O,k,m}(j) + b_{O,k,m} + \varepsilon_{\Sigma}[j] = b_{H,k,m} \quad (3.14)$$

Очевидно, это уравнение может быть записано по измерениям любого НКА по любому виду сигналов в любой момент времени на всём интервале измерений. Чтобы снизить влияние шума измерений $\varepsilon_{\Sigma}[j]$ измерения по одному виду сигналов осредняются на всём интервале наблюдений:

$$b_{H,k,m} = b_{O,k,m} + \sum_{j=1}^N (R_{H,k,m}(j) - R_{O,k,m}(j) - \rho_{H,k}(j) + \rho_{O,k}(j) - \\ - \Delta T(j) \cdot c - K_{H,k,m}(j) + K_{O,k,m}(j)) \quad (3.15)$$

Согласно этой формуле рассчитывается систематическая погрешность измерений псевдодальности калибруемой НАП. В качестве исходных данных принимаются:

1. измерения текущих навигационных параметров калибруемой НАП и опорной НАП не менее чем на суточном интервале измерений;
2. координаты фазового центра АФУ обеих НАП;
3. разность шкал времени в начальный момент и относительная разность частот опорных стандартов частоты НАП;
4. значения систематических погрешностей измерений псевдодальности опорной НАП.

Метод можно применять не для всех типов НАП, имеются следующие технические ограничения:

1. опорная и калибруемая НАП должны находиться на расстоянии не более 1 км друг от друга;

2. обе НАП должны иметь техническую возможность работы от внешнего опорного генератора;
3. в качестве внешнего опорного генератора должны использоваться высокостабильные водородные стандарты частоты с суточной относительной нестабильностью не хуже 10^{-15} [81].

3.3.2 Бюджет неопределённости

В соответствии с [75] и моделью измерений 3.15 суммарная стандартная неопределённость определяется по формуле:

$$u_c = \sqrt{2 \cdot u_\rho^2 + \left(\frac{u_{\Delta T}}{c}\right)^2 + u_O^2 + u_A^2}, \quad (3.16)$$

где u_ρ – стандартная неопределённость измерения из-за погрешности определения координат фазовых центров АФУ опорной и калибруемой НАП;

$u_{\Delta T}$ – стандартная неопределённость от погрешности измерений разности шкал опорных стандартов частоты НАП;

u_O – стандартная неопределённость калибровки опорной НАП;

u_A – стандартная неопределённость, обусловленная случайными величинами, оценённая по типу А.

Погрешность измерений координат фазовых центров АФУ опорной и калибруемой НАП современными геодезическими методами с применением государственного рабочего эталона единиц координат местоположения 1 разряда (№ 3.1.ZZT.168.2015 [82]) не превышает 0,02 м (СКО). При этом погрешности измерений координат опорной и калибруемой НАП не коррелированы между собой.

Стандартная неопределённость измерений расхождения шкал времени опорных стандартов частоты НАП при использовании современных измерителей временных интервалов (например частотомер 53230А фирмы Keysight, № ГР-СИ 51077-12) не превышает 0,02 нс.

Суммарная стандартная неопределённость калибровки опорной эталонной НАП непосредственным методом оценена ранее (раздел 3.2.3) и не превышает 0,06 м.

Вклад случайной погрешности измерений текущих навигационных параметров оценивается как стандартная неопределённость типа А u_A по результатам измерений. Но предварительно можно оценить её исходя из того, что для современных образцов НАП типовое значение СКО измерений псевдодальности не превышает 0,5 м, СКО измерений псевдоскорости не превышает 0,01 м/с [83], а на суточном интервале измерений будет накоплено не менее 720 замеров (с дискретностью 30 с). При этом $u_A = \frac{RMS}{\sqrt{N}}$, и шум измерений опорной и калибруемой НАП не коррелированы между собой. Т.о. $u_{A,R} = \sqrt{u_{R,O}^2 + u_{R,H}^2} \leq 0,03$ м, $u_{A,D} = \sqrt{u_{D,O}^2 + u_{D,H}^2} \leq 0,0006$ м/с. При этом для $u_{A,D}$ согласно формуле $K_{k,m} = D_{k,m} \cdot \lambda_{k,m} \cdot R_{k,m}/c$ и 3.2 коэффициентом чувствительности будет являться значение псевдодальности, которое в обычных условиях для НАП не превышает несколько десятков тысяч метров, а делителем – скорость света, которая больше на 3 порядка. СКО погрешности измерений псевдодальности в реальных условиях может сильно различаться из-за влияния помех и многолучёвости, но составляющая $u_{A,D}$ при любых условиях будет пренебрежимо мала по сравнению с $u_{A,R}$, поэтому не отражена в бюджете неопределённости калибровки.

Таблица 3.3. Бюджет неопределённости дифференциальной калибровки НАП

Источник неопределённости	Тип	Значение входной величины	Вероятностное распределение	Делитель	Коэффициент чувствительности	Значение неопределённости, м
Погрешность определения координат фазовых центров АФУ	B	0,02 м	Нормальное	1	$\sqrt{2}$	0.02

Таблица 3.3. Бюджет неопределённости дифференциальной калибровки НАП

Источник неопределённости	Тип	Значение входной величины	Вероятностное распределение	Делитель	Коэффициент чувствительности	Значение неопределённости, м
Систематическая погрешность измерения псевдодальности опорным комплектом НАП	B	0,06 м	Нормальное	1	1	0.06
Неопределённость измерений разности шкал опорных стандартов частоты	B	0,02 нс	Нормальное	c	1	0.006
Случайная погрешность измерений псевдодальности	A	0,06 м	Нормальное	1	1	0.06
Суммарная стандартная неопределённость						0.09
Расширенная неопределённость (k=2)						0.18

c – скорость света, $c = 299792458$ м/с (точная константа)

Суммарная стандартная неопределённость метода дифференциальной калибровки НАП в части систематической погрешности измерений псевдодальности не превышает 0,09 м.

3.3.3 Верификация метода непосредственной калибровки

Как показано ранее, верификация метода непосредственной калибровки необходима для подтверждения корректности результатов калибровки по имитированному сигналу. Для этого методом непосредственной калибровки оцениваются систематические погрешности измерений псевдодальности двух комплектов НАП, калибровочные поправки учитываются в программном обеспе-

чении НАП. После этого один комплект НАП используется в качестве опорного для дифференциальной калибровки второго.

Для верификации экспериментально проведена серия калибровок НАП дифференциальным методом на интервале 8 суток. Восьмисуточный интервал выбран из-за того, что интервал повторяемости трасс движения НКА и зон радиовидимости НКА наземными средствами составляет 17 витков (7 суток 23 часа 27 минут 28 секунд) [57].

При калибровке оценивались систематические погрешности измерений псевдодальности калибруемой НАП для каждого суточного сеанса измерений. В измерениях текущих навигационных параметров сразу учитывались значения систематической погрешности измерений псевдодальности, оценённые методом непосредственной калибровки. То есть полученные значения показывают расхождение результатов калибровок обоими методами.

На рисунке 3.6 показаны графики калибровочных поправок к измерениям псевдодальности по сигналам с открытым доступом в частотном диапазоне L1 по всем литерам рабочих частот ГЛОНАСС (кроме -5 и -6, которые не были представлены в системе на момент проведения эксперимента).

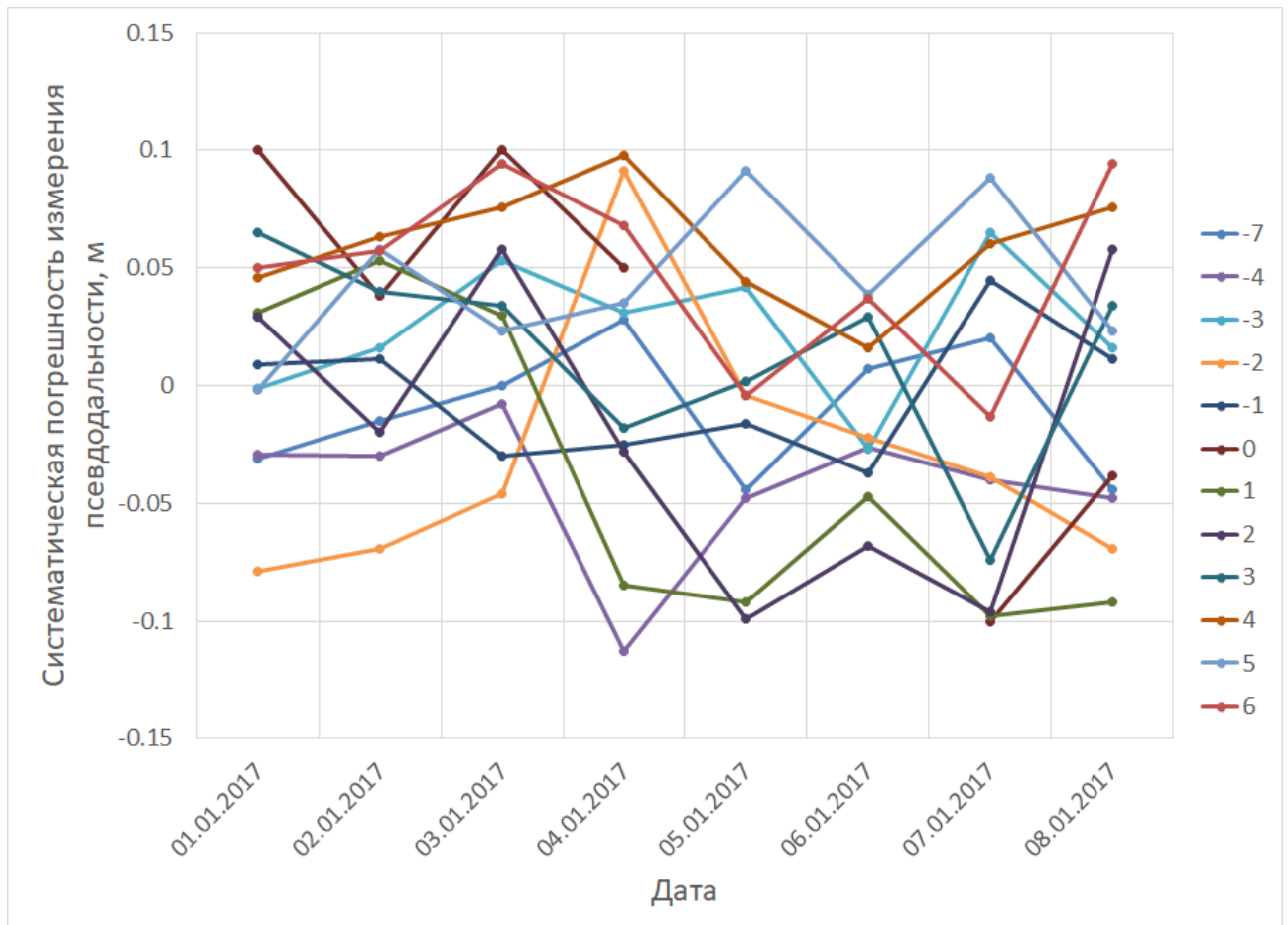


Рис. 3.6 – Результаты ежесуточной калибровки

На графике видно, что значения оценённых калибровочных поправок в течение всей серии измерений не выходят за пределы $\pm 0,1$ м. При этом суммарная стандартная неопределённость калибровки дифференциальным методом, рассчитанная ранее, соответствует 0,09 м.

Экспериментально подтверждена сходимость результатов калибровки НАП методом непосредственной калибровки и дифференциальным методом в пределах $\pm 0,1$ м, что соответствует суммарной стандартной неопределённости менее точного метода.

3.4 Выводы

1. Разработан метод калибровки НАП системы ГЛОНАСС на основе использования имитатора навигационных сигналов и эталона фазовых параметров антенн, прослеживаемых к государственным первичным эталонам еди-

ниц величин. Достигнута суммарная стандартная неопределённость калибровки в части систематической инструментальной погрешности измерений псевдодальности не более 0,06 м.

2. Разработанный метод калибровки НАП ГЛОНАСС обеспечивает определение калибровочных поправок к значениям псевдодальности на основе измерения задержек навигационного сигнала от фазового центра антенны до выхода метки внутренней шкалы времени приемно-измерительного устройства НАП для литер рабочих частот (от минус 7 до 6) в частотных диапазонах L1 и L2 для сигналов с открытым и санкционированным доступом.
3. Проведена верификация разработанного метода калибровки НАП и установлена сходимость результатов калибровки разработанным методом и дифференциальным методом по сигналам, излучаемым НКА системы ГЛОНАСС. Отличие результатов не превышает значение суммарной стандартной неопределённости калибровки.
4. Установлено, что суммарная стандартная неопределенность калибровки НАП дифференциальным методом с использованием калиброванной НАП в качестве эталона и апостериорных значений ЭВИ системы ГЛОНАСС не превышает 0,1 м. При этом калибровка НАП может проводиться в местах ее штатной эксплуатации без прерывания работы.

4 Исследование результатов калибровки при сличениях эталонов единиц времени и частоты и определении местоположения по сигналам ГЛОНАСС

4.1 Оценка стабильности результатов калибровки

Для оценки стабильности результатов калибровки НАП на больших интервалах проведён длительный эксперимент. На годовом интервале раз в неделю проводилась дифференциальная калибровка трёх образцов НАП прецизионного класса из состава комплекса метрологического обеспечения и калибровки БИС:

1. GTR51, производства фирмы Mesit, Чехия;
2. SIGMA, производства фирмы JAVAD, США;
3. Net-G5, производства фирмы Topcon, США.

В качестве опорной НАП использовался эталонный комплект GTR51 из состава комплекса метрологического обеспечения и калибровки БИС. Эталонный комплект функционирует с использованием в качестве внешних сигналов опорной частоты и метки времени сигналы первичного эталона времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018. Эталонный комплект размещён в термостатированном помещении, в котором поддерживается температура окружающей среды в пределах $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

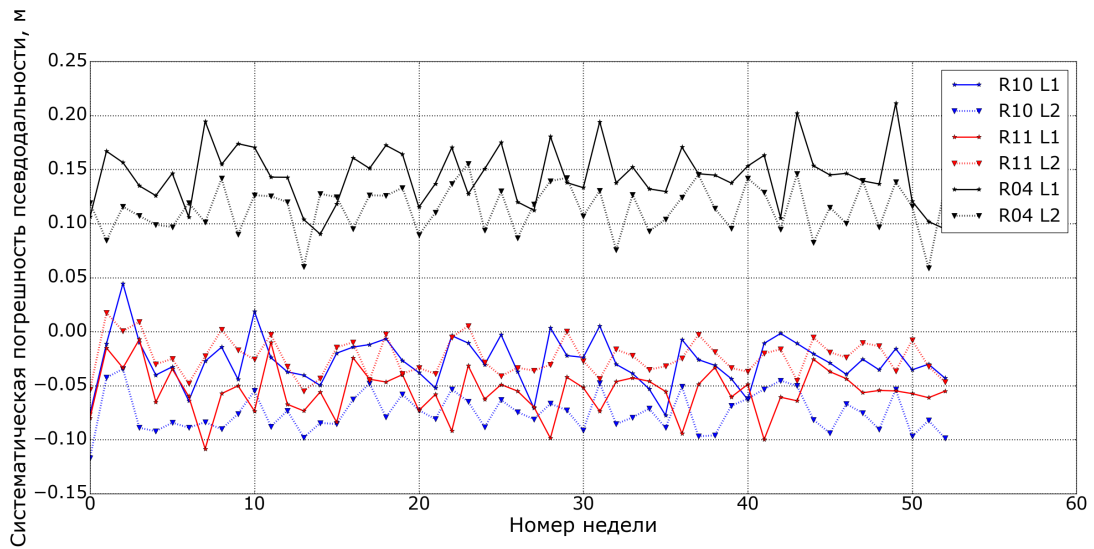
Каждый комплект НАП функционировал с штатной ГНСС антенной, антенны расположены на удалении не более 1 км от опорной НАП. В качестве источников опорной частоты использовались высокостабильные водородные генераторы СЧВ производства АО «Время-Ч», Россия. Приёмно-измерительные устройства из состава комплектов НАП размещены в лабораторных условиях, температура внешней среды в пределах $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Антенны НАП размещены

во внешней среде, в течение года температура воздуха изменялась от минус 30 до 30°C.

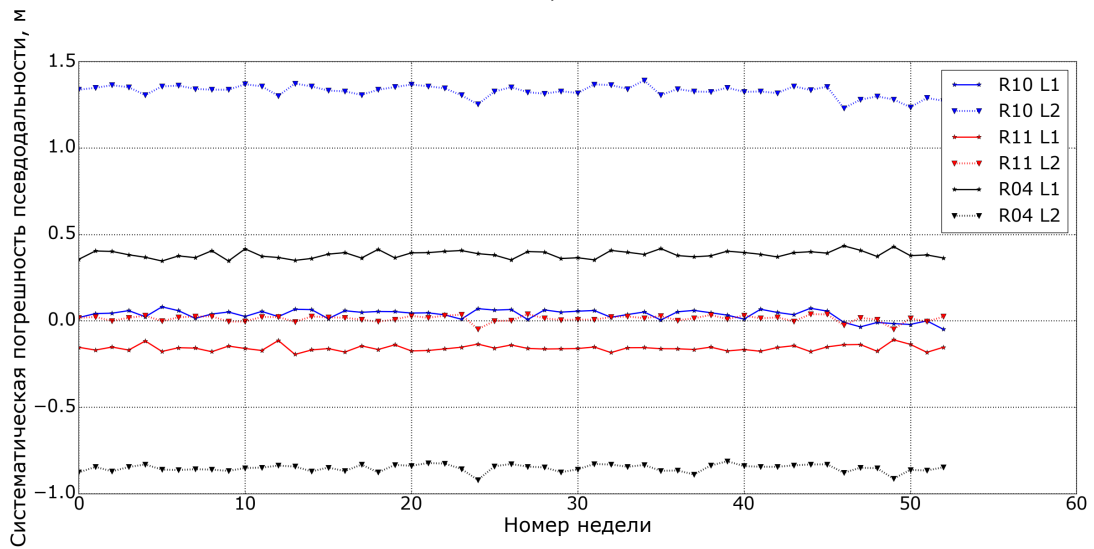
Все НАП предварительно откалиброваны непосредственным (абсолютным) методом, для GTR51 оценённые калибровочные поправки учитывались при измерениях штатным программным обеспечением. Ранее подтверждено, что результаты непосредственной и дифференциальной калибровок различаются не более чем на 0,1 м (раздел 3.3.3).

В качестве опорной НАП использован комплект эталонной аппаратуры для высокоточного сравнения шкал времени GTR51 (№ ГРСИ 62050-15 [77]). Опорная НАП предварительно откалибрована непосредственным (абсолютным) методом. В измерениях учтены калибровочные поправки к измерениям псевдодальности по сигналам ГНСС ГЛОНАСС для всех литеров рабочих частот в частотных диапазонах L1 и L2 для сигналов с открытым и санкционированным доступом. В качестве опорной частоты и шкалы времени использованы сигналы первичного эталона единицы времени и частоты ГЭТ 1-2018.

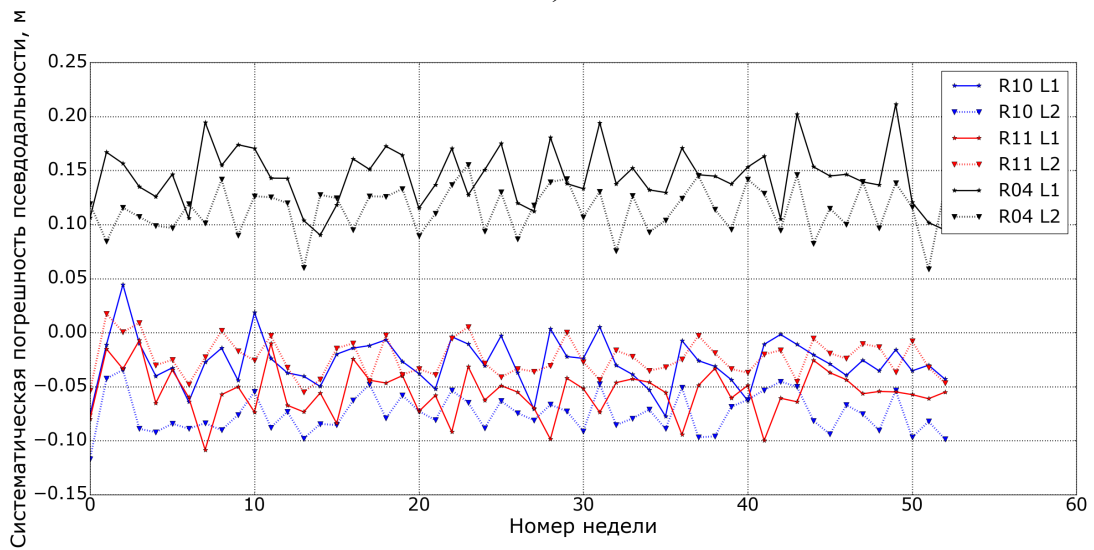
На рисунке 4.1 показаны графики зависимости оценённых калибровочных поправок от времени в течение года (52 недели) от 1 июля 2017 г. по 30 июня 2018 г. для всех испытуемых НАП. В силу большого количества оцениваемых характеристик (56 поправок для каждого образца НАП раз в неделю в течение года), для обеспечения наглядности результатов показаны только систематические погрешности измерений псевдодальности по сигналам ГЛОНАСС с открытым доступом для -7, 0 и +6 литер рабочей частоты в частотных диапазонах L1 и L2. -7, 0 и +6 литеры соответствуют 10/14, 11/15 и 4/8 номеру рабочей точки (R10/R14, R11/R15, R04/R08).



а)



б)



в)

Рис. 4.1 – Результаты калибровки НАП: а) GTR51; б) SIGMA; в) Net-G5

Таким образом, для всех испытанных образцов на годовом интервале калибровочные поправки менялись в пределах $\pm 0,1$ м, что не превышает расширенную неопределённость калибровки дифференциальным методом $U = 0,18$ м (раздел 3.3.2).

4.2 Влияние на погрешность передачи шкалы времени

НАП ГЛОНАСС широко применяется для обеспечения сличений эталонов единиц времени и частоты метрологическими лабораториями по всему миру [84, 85, 15, 86, 87].

В частности, один из штатных каналов сличений вторичных эталонов единиц времени и частоты с первичным эталоном – по сигналам ГЛОНАСС с использованием специализированной частотно-временной НАП [88, 89].

4.2.1 Метод сравнений шкал времени по сигналам ГЛОНАСС

На рисунке 4.2 показана схема измерений самого популярного метода измерения расхождения шкал времени по сигналам ГЛОНАСС – метода Common View, описанного, например, в [90, 15]. Частотно-временные НАП (НАП1 и НАП2) установлены на твердых точках. Каждая НАП непрерывно и круглосуточно осуществляет измерения текущих навигационных параметров по сигналам ГЛОНАСС во внешней шкале времени, то есть в шкале времени соответствующего эталона времени и частоты.

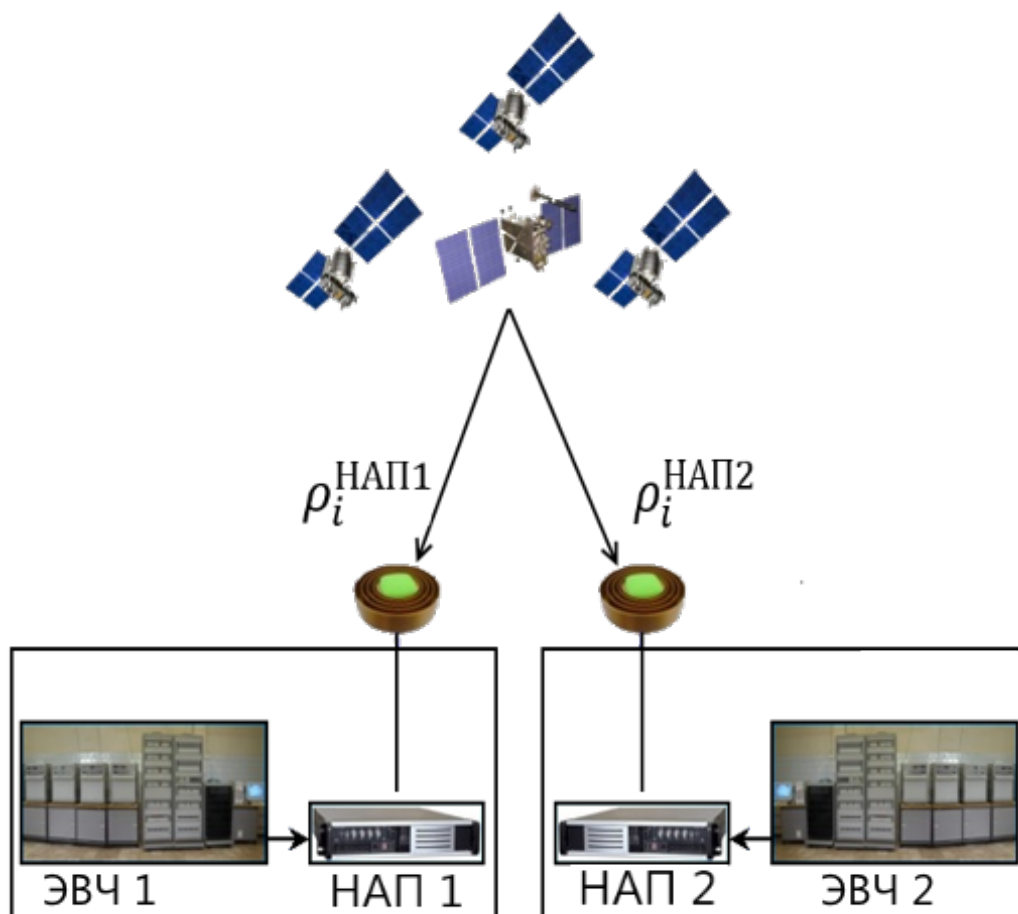


Рис. 4.2 – Схема измерений расхождений шкал времени методом Common-View

Результаты измерений псевдодальности с обеих НАП подвергают обработке по формуле:

$$\Delta T(j) = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^N ((R_i^{\text{НАП1}}(j) - R_i^{\text{НАП2}}(j)) - (\rho_i^{\text{НАП1}}(j) - \rho_i^{\text{НАП2}}(j))) \quad (4.1)$$

где $R_i^{\text{НАП1}}$, $R_i^{\text{НАП2}}$ – измерения псевдодальности первой и второй НАП соответственно, в j -й момент времени,

$i = 1..N$ – номер НКА в зоне видимости из N видимых НКА,

$\rho_i^{\text{НАП1}}(j)$, $\rho_i^{\text{НАП2}}(j)$ – геометрическая дальность между фазовыми центрами антенн НАП и i -го НКА,

$\Delta T(j)$ – разность шкал времени первой и второй НАП в j -й момент времени.

4.2.2 Результаты учёта калибровочных поправок

В работе предложено использование калиброванных комплектов НАП для сличения эталонов единиц времени и частоты.

Для оценки влияния систематической погрешности измерений псевдодальности по сигналам ГЛОНАСС на погрешность измерений расхождений шкал времени были обработаны измерения калиброванных комплектов НАП ГЛОНАСС, размещённых на государственном первичном эталоне времени и частоты ГЭТ 1-2012 [52] и вторичном эталоне ВЭ-31. Оба эталона находятся в пределах Московской области, на расстоянии менее 100 км.

На рисунке 4.3 показан график расхождений шкал времени удалённых эталонов по результатам обработки измерений НАП ГЛОНАСС на суточном интервале без учёта калибровочных поправок к измерениям псевдодальности. Отдельно показаны графики по результатам обработки сигналов в частотных диапазонах L1 и L2. Стоит отметить, что точность измерений соответствует точности действующего штатного канала сличений эталонов ГЭТ 1-2012 и ВЭ-31. В качестве опорных измерений использованы измерения расхождения шкал времени с помощью перевозимых квантовых часов (ПКЧ) из состава ГЭТ 1-2012.

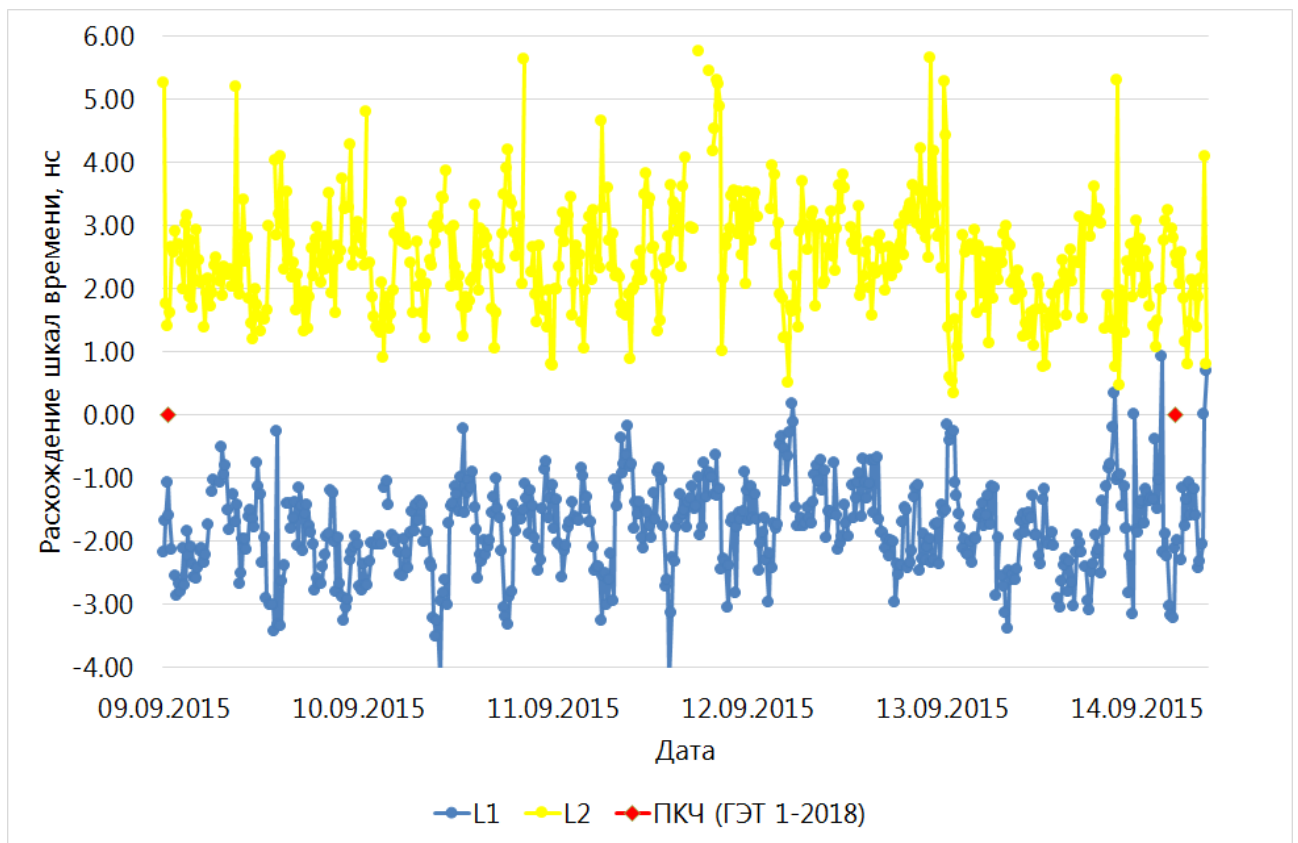


Рис. 4.3 – Измерения расхождения шкал времени по сигналам ГЛОНАСС без учёта калибровочных поправок

Для учёта калибровочных поправок формула 4.1 дополнена слагаемым, соответствующим разности значений систематических погрешностей измерений псевдодальности НАП1 и НАП2, которые были определены по результатам непосредственной калибровки (метод описан ранее в разделе 3.2):

$$\Delta T(j) = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^N ((R_i^{\text{НАП1}}(j) - R_i^{\text{НАП2}}(j)) - (\rho_i^{\text{НАП1}}(j) - \rho_i^{\text{НАП2}}(j)) - (b_i^{\text{НАП1}} - b_i^{\text{НАП2}})) \quad (4.2)$$

где $R_i^{\text{НАП1}}$, $R_i^{\text{НАП2}}$ – измерения псевдодальности первой и второй НАП соответственно, в j -й момент времени,

$i = 1..N$ – номер НКА в зоне видимости из N видимых НКА,

$\rho_i^{\text{НАП1}}(j)$, $\rho_i^{\text{НАП2}}(j)$ – геометрическая дальность между фазовыми центрами антенн НАП и i -го НКА,

$b_i^{\text{НАП1}}(j)$, $b_i^{\text{НАП2}}(j)$ – систематические погрешности измерений псевдодально-

сти по сигналам i -го НКА,

$\Delta T(j)$ – разность шкал времени первой и второй НАП в j -й момент времени.

На рисунке 4.4 показан график расхождений шкал времени удалённых эталонов по результатам обработки измерений НАП ГЛОНАСС на суточном интервале с учётом калибровочных поправок к измерениям псевдодальности. Показаны графики по результатам обработки сигналов в частотных диапазонах L1 и L2. В качестве опорных измерений использованы измерения расхождения шкал времени с помощью перевозимых квантовых часов (ПКЧ) из состава ГЭТ 1-2012.

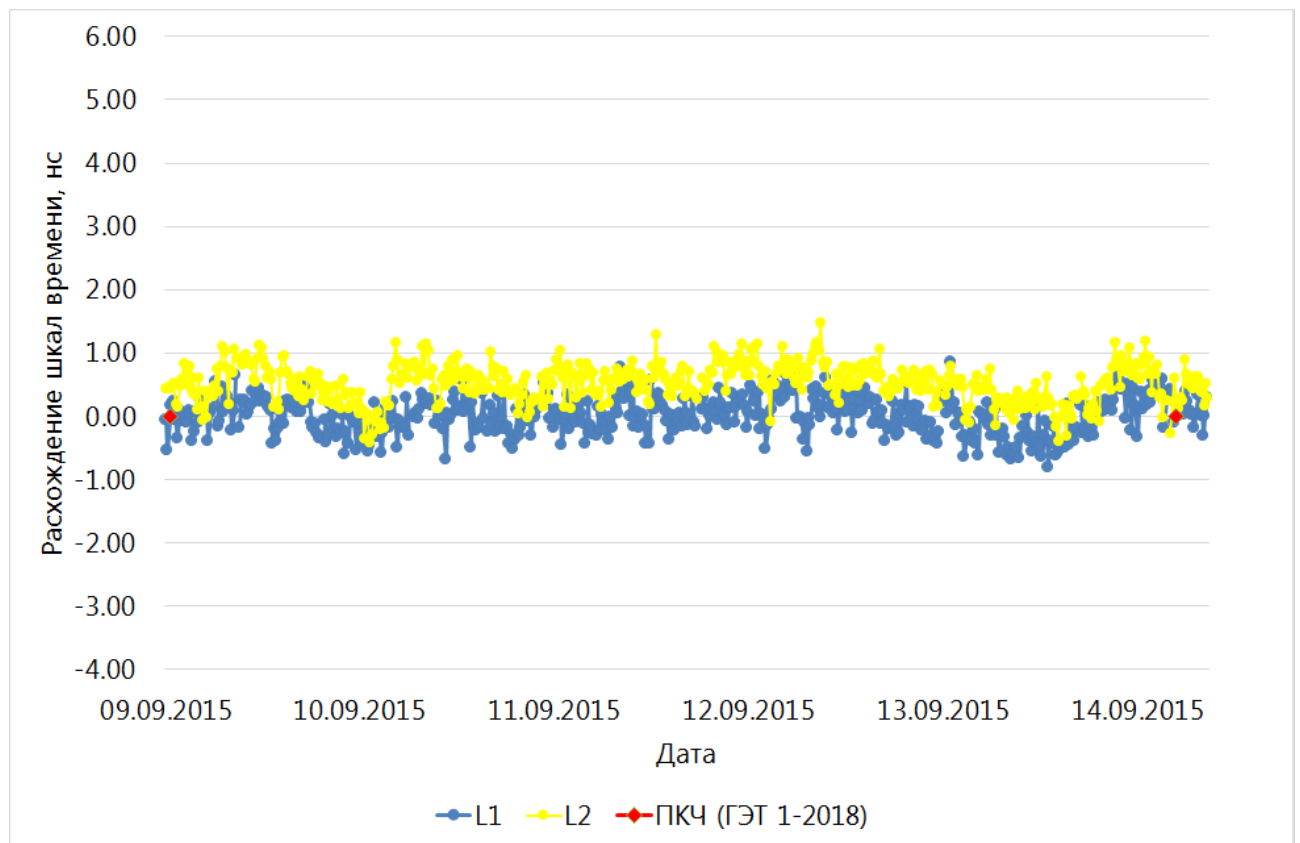


Рис. 4.4 – Измерения расхождения шкал времени по сигналам ГЛОНАСС с учётом калибровочных поправок

В таблице 4.1 приведены численные характеристики погрешности измерений расхождения шкал времени с учётом и без учёта калибровочных поправок к измерениям псевдодальности. Точность сличений без учёта калибровочных поправок соответствует точности действующего штатного канала сличений по

сигналам ГЛОНАСС рассматриваемых эталонов.

Таблица 4.1. Погрешность измерений расхождений шкал времени по сигналам ГЛОНАСС

Вид сигналов	Среднее значение погрешности	СКО погрешности
ГЛОНАСС L1	-1,8	0,7
ГЛОНАСС L1 с учётом калибровки	0,1	0,3
ГЛОНАСС L2	2,5	0,8
ГЛОНАСС L2 с учётом калибровки	0,4	0,3

Использование эталонных калиброванных комплектов НАП ГЛОНАСС позволило снизить систематическую составляющую погрешности измерений до субнаносекундного уровня, что подтверждено средствами первичного эталона (ПКЧ). Также уменьшилось СКО погрешности измерений, поскольку погрешность измерений расхождения шкал времени содержит линейную комбинацию систематических погрешностей измерений псевдодальности по всем общим видимым НКА, а состав и конфигурация спутниковой группировки меняется со временем.

4.2.3 Расчёт бюджета погрешности

Погрешность определения разности шкал времени в соответствии с формулой измерений 4.2 будет включать в себя несколько составляющих:

1. систематическая погрешность измерений псевдодальности по сигналам ГЛОНАСС;
2. случайная погрешность измерений псевдодальности по сигналам ГЛОНАСС;
3. погрешность определения геометрических дальностей от фазового центра АФУ НАП до НКА;

4. погрешность, обусловленная неучтённой разницей состояния атмосферы в местах размещения.

Систематическая погрешность измерений псевдодальности по сигналам ГЛОНАСС оценивается как расширенная неопределённость калибровки НАП. Расширенная неопределённость рассчитана ранее в разделе 3.2. Согласно расчётам $\Delta_{\text{НАП}} \leq 0,12$ м.

Случайная погрешность измерений псевдодальности по сигналам ГЛОНАСС – нормально распределённый случайный процесс. Типовая погрешность измерений псевдодальности современных НАП не превышает 0,5 м [83]. Поскольку при расчётах используются измерения, сглаженные на интервале не менее 30 с и усредняются измерения по всем видимым НКА, случайная погрешность существенно снижена [15]. В этом случае СКО погрешности измерений псевдодальности $\sigma_{\text{НАП}} \leq 0.03$ м.

Погрешность измерений координат фазовых центров АФУ опорной и калибруемой НАП современными геодезическими методами с применением государственного рабочего эталона единиц координат местоположения 1 разряда (№ 3.1.ZZT.168.2015 [82]) не превышает 0,02 м (СКО). Поскольку при расчётах используется только разница расстояний до одного и того же НКА от разных НАП, то погрешность эфемеридной информации НКА не вносит существенный вклад в погрешность определения расстояний (при дистанции между НАП не более 100 км). Таким образом $\Delta_{\rho} \leq 0,02$ м, имеет квазисистематический характер на интервале измерений.

При дистанциях между сличаемыми эталонами не более 100 км состояние атмосферы будет слабо отличаться, то есть задержки в тропосфере и ионосфере для обеих НАП будут практически одинаковы. В соответствии с наиболее точными моделями тропосферы [91, 5] и ионосферы [5] в условиях спокойной атмосферы разница задержек в атмосфере для двух НАП $\Delta_{\text{АТМ}} \leq 0,03$ м, и имеет квазисистематический характер на интервале измерений ([48, 6]).

Все составляющие приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Составляющие погрешности измерений расхождения шкал времени по сигналам ГЛОНАСС

Составляющая погрешности	Значение	Примечание
Систематическая погрешность измерений псевдодальности НАП	0,12 м	нормальное распределение
Случайная погрешность измерения псевдодальности НАП	$\sigma = 0,03$ м	нормальное распределение
Погрешность определения разности геометрических дальностей от НАП до НКА	0,02 м	квазисистематический характер на интервале измерений
Погрешность, обусловленная неучтённой разницей состояния атмосферы в местах размещения НАП	0,03 м	квазисистематический характер на интервале измерений

Границы погрешности определения разности шкал времени удалённых эталонов времени и частоты по уровню доверительной вероятности 0,95 определяются по формуле:

$$P(0,95) = \frac{\sqrt{2} \cdot \Delta_{\text{НАП}} + \Delta_{\text{АТМ}} + \Delta_{\rho} + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_{\text{НАП}}}{c} \approx 1 \times 10^{-9} \text{с}, \quad (4.3)$$

Итоговая модуль погрешности определения разности шкал времени удалённых эталонов времени и частоты по сигналам ГЛОНАСС с учётом систематических погрешностей измерений псевдодальности не превысит 1 нс (по уровню доверительной вероятности 0,95).

Таким образом, установлено, что использование калиброванных комплектов НАП, обеспечивает сличение эталонов единиц времени и частоты по сигналам ГЛОНАСС с погрешностью в пределах ± 1 нс. Это соответствует точности одного из наиболее точных методов сличений – с помощью перевозимых

квантовых часов [88].

4.3 Влияние на погрешность определения координат

4.3.1 Программный комплекс для моделирования решения навигационной задачи

Для обработки первичных измерений НАП существуют различные пакеты программного обеспечения, предоставляющие разные возможности и инструменты для работы с навигационно-временной информацией. Из некоммерческих наиболее известны пакеты RTKLib, GPStk и gLab.

RTKLib — программное обеспечение, предназначенное для определения местоположения в режиме стандартной и высокой точности. RTKLib имеет широкие функциональные возможности, позволяет работать по измерениям различных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в режиме реального времени и в постобработке, поддерживает обработку множества форматов файлов навигационных измерений, в том числе проприетарных протоколов навигационных приемников. Несмотря на обилие функций, RTKLib имеет ограниченное количество моделей для расчета задержки распространения сигнала, а также не позволяет учитывать инструментальную систематическую погрешность измерения псевдодальности в НАП [92, 93].

GPStk — программное обеспечение, разрабатываемое лабораторией прикладных исследований Техасского университета в Остине. Представляет собой пакет для решения фундаментальных и прикладных задач, работы с распространенными форматами навигационных измерений и эфемерид. Проект нацелен на систему GPS и не позволяет проводить обработку измерений по сигналам других ГНСС [94].

gLab — кроссплатформенный программный пакет для обработки и анализа навигационной информации, разработанный Политехническим университетом Каталонии, который предоставляет возможность работы в режимах с

различной точностью. К недостаткам пакета можно отнести невозможность работы по сигналам ГЛОНАСС и небольшой выбор моделей для расчета погрешности измерения псевдодальности [95].

Для оценки влияния систематических погрешностей измерений псевдодальности на погрешность измерений координат необходим программный комплекс, который обеспечивает возможность работы по сигналам ГЛОНАСС во всех частотных диапазонах, выбор моделей учёта составляющих погрешности оценки псевдодальности, в том числе инструментальной составляющей погрешности, а также навигационных алгоритмов, реализуемых в существующей НАП. Таким образом программный комплекс должен реализовывать следующие возможности:

1. работать по всем сигналам ГЛОНАСС;
2. предоставлять широкий выбор моделей учёта погрешности измерения псевдодальности;
3. предоставлять выбор различных навигационных алгоритмов;
4. иметь средства статистической обработки результатов и средства визуализации данных измерений и статистической информации;
5. обеспечивать учёт инструментальной составляющей погрешности измерения псевдодальности в НАП.

Ни один из рассмотренных выше существующих пакетов ПО всех перечисленных возможностей не имеет. Для оценки влияния систематических погрешностей псевдодальности на погрешность измерений координат использовался программный комплекс, представленный в [96]. Программный комплекс позволяет создавать конфигурации в целях массового автоматизированного расчета оценки точности решения навигационной задачи. В конфигурации можно указывать тип спутниковой системы, по которой будет получено решение, список эффектов и моделей для их расчета, тип измерений и маску угла возвышения космического аппарата.

Для учета сдвига шкалы времени каждого НКА относительно системной

шкалы времени в программном комплексе реализовано получение временной поправки из различных источников: навигационного сообщения, системы высокоточного определения эфемерид и временных поправок, широкозонной системы дифференциальной коррекции.

При вращении спутника вокруг Земли возникают релятивистские и гравитационные эффекты. В программном комплексе учитывается влияние эффектов, которые вносят наибольший вклад в погрешность определения псевдодальности: разный ход часов космического аппарата в апогее и перигее, связанный с отличием траектории орбиты НКА от круговой, и изменение местоположения НАП в результате вращения Земли.

Для определения задержки сигнала, вносимой тропосферой, предусмотрена возможность использования разных моделей для расчета компонентов задержки, вызванных сухой и влажной частями тропосферы. Используются такие модели тропосферы, как MOPS, разработанная европейской геостационарной службой навигационного покрытия EGNOS, и UNB3, разработанная университетом Нью-Брансуика, GCAT, модель Нейла [91]. Также пользователю предоставляется возможность выбора из нескольких функций отображения (функций учёта угла возвышения НКА).

Для одночастотных приемников в программном комплексе также предусмотрена возможность использования разных вариантов моделей ионосферы: Klobuchar, NeQuick, глобальных карт ионосферы в формате IONEX.

Реализован учёт систематических погрешностей измерений псевдодальности в виде таблицы калибровочных поправок к каждому типу сигналов всех литер рабочей частоты всех частотных диапазонов.

Для получения первичных навигационных измерений использовалась навигационная аппаратура потребителя JAVAD Sigma G3T в комплекте с широкодиапазонной антенной NovAtel GNSS-750, установленная на геодезическом пункте с известными координатами из состава государственного первичного специального эталона длины ГЭТ 199-2018. Исследование состояло из

нескольких этапов:

1. сбор первичных измерений НАП ГНСС в течение 75 суток;
2. моделирование решения навигационной задачи на каждом суточном интервале в шести вариантах: по сигналам ГЛОНАСС с открытым/санкционированным доступом с/без учета калибровочных поправок, по сигналам GPS с открытым/санкционированным доступом (приём сигналов с санкционированным доступом в коммерческих НАП реализован по материалам открытой печати [97, 63]);
3. сбор статистики погрешности определения координат на каждом суточном интервале;
4. сравнение полученных результатов решений.

Параметры решения навигационной задачи на каждом суточном интервале:

1. высокоточная эфемеридно-временная информация, распространяемая информационно - аналитическим центром координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО);
2. учёт релятивистских и гравитационных эффектов (поправка часов из-за эллиптичности орбиты и вращения Земли);
3. учёт задержки сигнала в тропосфере по модели MOPS;
4. устранение задержки сигнала в ионосфере с использованием двухчастотных измерений;
5. для борьбы с многолучевым распространением сигнала обрабатываются измерения для НКА с углом возвышения не менее 10° ;
6. для учета систематической инструментальной погрешности измерений псевдодальности используется таблица калибровочных поправок по всем типам сигналов, которая получена в результате калибровки исследуемой НАП 3.2.

4.3.2 Результаты учёта калибровочных поправок

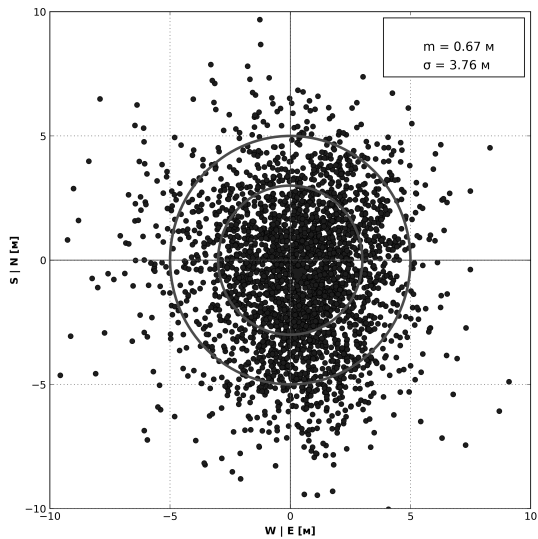
Использованы следующие обозначения сценариев решения навигационной задачи:

1. GPS OC cal – измерения по сигналам GPS с открытым доступом с учётом калибровочных поправок;
2. GPS SC cal – измерения по сигналам GPS с санкционированным доступом с учётом калибровочных поправок;
3. GLO OF – измерения по сигналам ГЛОНАСС с открытым доступом без учёта калибровочных поправок;
4. GLO OF cal – измерения по сигналам ГЛОНАСС с открытым доступом с учётом калибровочных поправок;
5. GLO SF – измерения по сигналам ГЛОНАСС с санкционированным доступом без учёта калибровочных поправок;
6. GLO SF cal – измерения по сигналам ГЛОНАСС с санкционированным доступом с учётом калибровочных поправок.

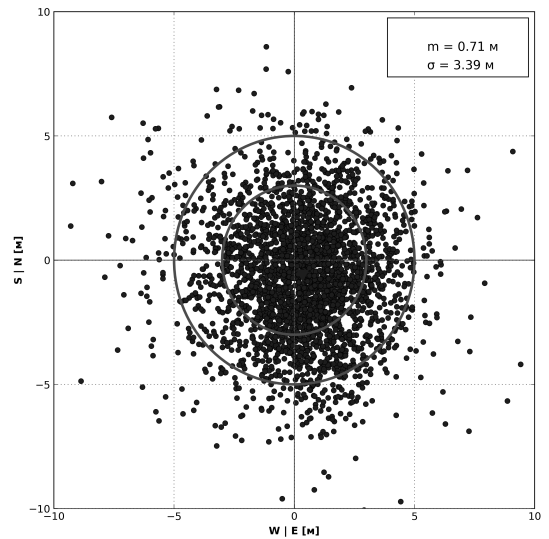
На каждом суточном интервале оценивались границы погрешности определения пространственных координат, принимая координаты геодезического пункта из состава государственного первичного специального эталона длины ГЭТ 199-2018 за истинные.

Для наглядности на рисунках 4.5, 4.6, 4.7 показаны результаты решения навигационной задачи на одном суточном интервале как разброс погрешностей координат в плане. Центр мишени соответствует истинным координатам.

На рисунке 4.5 показано влияние учёта калибровочных поправок на погрешность определения координат в плане при работе по сигналам ГЛОНАСС с открытым доступом. Учёт калибровочных поправок позволяет снизить погрешность определения координат на 10 %.



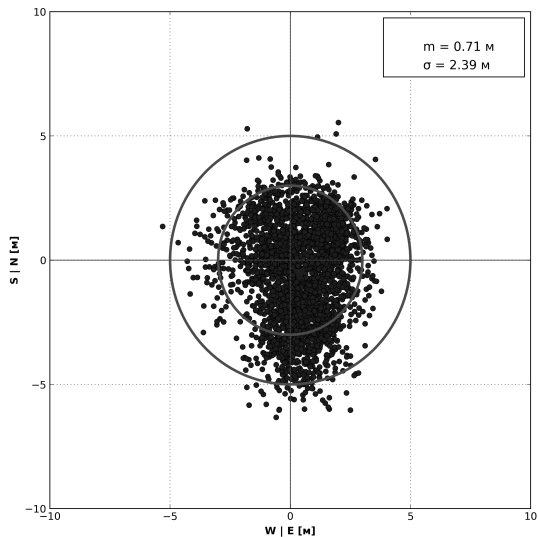
а)



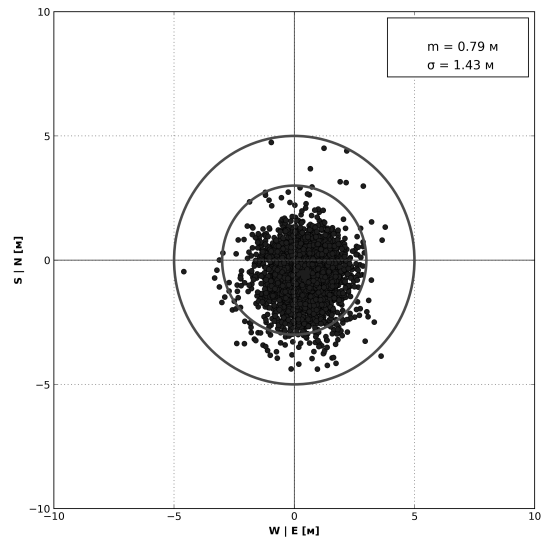
б)

Рис. 4.5 – Погрешность определения координат в плане по сигналам ГЛОНАСС с открытым доступом: а) без учёта калибровочных поправок; б) с учётом

На рисунке 4.6 показано влияние учёта калибровочных поправок на погрешность определения координат в плане при работе по сигналам ГЛОНАСС с санкционированным доступом. Влияние существенное, учёт калибровочных поправок позволяет снизить погрешность определения координат на 40 %.



а)



б)

Рис. 4.6 – Погрешность определения координат в плане по сигналам ГЛОНАСС с санкционированным доступом: а) без учёта калибровочных поправок; б) с учётом

Для сравнения на рисунке 4.7 показаны результаты измерений координат по сигналам GPS с открытым и санкционированным доступом. Результаты приведены сразу с учётом калибровочных поправок. Оценка влияния систематических погрешностей измерений псевдодалности по сигналам GPS в работе не рассматривалось. Однако, можно сделать вывод, что точность измерений координат в плане по сигналам GPS сравнима с точностью по сигналам ГЛОНАСС при условии учёта калибровочных поправок.

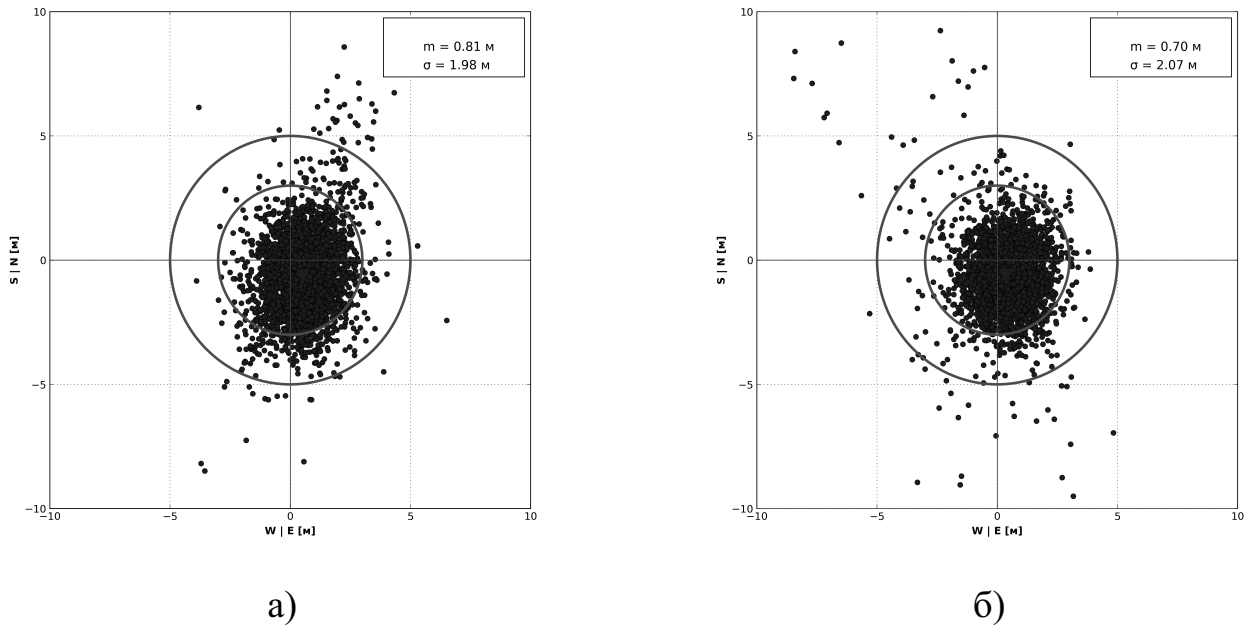


Рис. 4.7 – Погрешность определения координат в плане по сигналам GPS: а) с открытым доступом; б) с санкционированным доступом

Хорошо заметно улучшение точности при использовании калибровочных поправок к измерениям псевдодальности НАП. Размер «пятна рассеяния» соответствует величине случайно погрешности измерений координат. Уменьшение случайной составляющей погрешности измерений координат обусловлено тем, что вектор ошибки измерений координат в каждый момент времени является линейной комбинацией систематических погрешностей измерений псевдодальностей до всех видимых космических аппаратов с коэффициентами пропорциональности, зависящими от углов направления на НКА. Состав и конфигурация спутниковой группировки постоянно изменяется, поэтому модуль и направление вектора ошибки непостоянны во времени.

Значения границ погрешности (по уровню вероятности 0,67) определения пространственных координат на каждом суточном интервале для шести сценариев моделирования решения навигационной задачи, приведены в таблице 4.3. Прочерки соответствуют дням, в которые из-за неблагоприятной помеховой обстановки были получены неликвидные измерения.

Таблица 4.3. Границы погрешности определения пространственных координат

Дата	GPS cal	OC	GPS SC cal	GLO OF	GLO cal	OF	GLO SF	GLO SF cal
22.01.2018	3,91		2,81	6,98	6,25		4,31	2,61
23.01.2018	3,93		2,91	6,69	5,96		4,25	2,48
24.01.2018	4,04		2,93	6,63	5,88		4,25	2,43
25.01.2018	4,04		2,94	6,50	5,84		4,15	2,49
26.01.2018	3,98		2,97	6,80	6,16		4,16	2,63
27.01.2018	4,14		2,95	6,99	6,27		4,26	2,64
28.01.2018	4,12		2,93	7,14	6,37		4,47	2,71
29.01.2018	4,09		2,97	7,06	6,32		4,31	2,59
30.01.2018	3,88		2,97	6,96	6,28		4,36	2,65
31.01.2018	3,96		2,99	6,51	5,84		4,27	2,47
01.02.2018	3,95		3,04	6,64	5,93		4,34	2,53
02.02.2018	4,32		3,06	6,84	6,22		4,21	2,50
03.02.2018	4,12		2,98	6,80	6,17		4,30	2,61
04.02.2018	4,16		2,91	6,83	6,18		4,28	2,61
05.02.2018	4,20		2,91	6,87	6,28		4,38	2,68
06.02.2018	4,43		2,95	6,56	6,15		4,16	2,74
07.02.2018	4,09		2,96	7,17	6,42		4,74	2,95
08.02.2018	4,22		2,95	6,50	5,81		4,20	2,42
09.02.2018	4,20		2,96	6,56	5,94		4,20	2,57
10.02.2018	4,23		2,96	6,65	6,04		4,15	2,56
11.02.2018	-		2,93	7,10	6,37		4,44	2,72
12.02.2018	-		2,90	6,99	6,42		4,47	2,72
13.02.2018	4,47		3,46	6,88	6,18		4,36	2,62
14.02.2018	4,25		2,98	6,65	5,96		4,32	2,52
15.02.2018	4,30		3,03	6,67	5,97		4,35	2,51
16.02.2018	4,26		2,93	6,52	5,92		4,18	2,57
17.02.2018	4,11		2,93	6,70	6,08		4,11	2,51
18.02.2018	4,40		2,88	6,97	6,28		4,29	2,55
19.02.2018	4,19		2,96	7,12	6,37		4,42	2,68

Таблица 4.3. Погрешности определения координат на суточном интервале

Дата	GPS cal	OC	GPS SC cal	GLO OF	GLO OF cal	GLO SF	GLO SF cal
20.02.2018	4,10		2,91	6,87	6,25	4,40	2,65
21.02.2018	4,45		2,88	6,90	6,20	4,30	2,59
22.02.2018	4,48		2,87	6,50	5,83	4,23	2,45
23.02.2018	4,26		2,88	6,51	5,84	4,36	2,50
24.02.2018	4,19		2,90	6,27	5,77	4,14	2,51
25.02.2018	4,18		2,83	6,64	6,05	4,16	2,57
26.02.2018	4,64		2,82	6,64	6,01	4,16	2,58
27.02.2018	4,20		2,92	6,80	6,23	4,38	2,67
28.02.2018	4,34		2,97	6,85	6,34	4,35	2,70
01.03.2018	4,46		2,80	6,64	6,15	4,26	2,63
02.03.2018	4,60		2,83	6,43	5,88	4,17	2,53
03.03.2018	4,58		2,83	6,39	5,88	4,39	2,62
04.03.2018	4,47		2,92	6,29	5,87	4,11	2,58
05.03.2018	4,40		2,87	6,58	6,11	4,32	2,67
06.03.2018	4,37		2,92	6,96	6,34	4,41	2,67
07.03.2018	4,39		2,92	6,78	6,26	4,17	2,57
08.03.2018	4,38		-	6,86	6,38	4,37	2,76
09.03.2018	4,50		2,91	6,62	6,12	4,40	2,61
10.03.2018	4,56		2,94	6,48	6,01	4,44	2,66
11.03.2018	5,00		2,85	6,60	6,23	4,44	3,05
12.03.2018	-		2,99	6,88	6,20	4,61	2,67
13.03.2018	-		2,83	6,79	6,40	4,18	2,66
14.03.2018	4,76		2,87	7,29	6,77	4,42	2,81
15.03.2018	4,50		2,89	7,31	6,61	4,78	2,76
16.03.2018	5,03		2,97	6,93	6,42	4,40	2,75
17.03.2018	4,99		2,87	6,65	6,15	4,38	2,63
18.03.2018	5,06		2,90	6,70	6,19	4,41	2,63
19.03.2018	4,63		2,97	6,60	6,32	4,14	2,68
20.03.2018	4,79		3,41	6,82	6,35	4,26	2,68
21.03.2018	4,63		3,06	7,69	6,78	-	3,12

Таблица 4.3. Погрешности определения координат на суточном интервале

Дата	GPS cal	OC	GPS SC cal	GLO OF	GLO cal	OF	GLO SF	GLO SF cal
22.03.2018	4,62		3,06	7,51	7,09		4,48	2,93
23.03.2018	4,65		2,96	6,87	6,38		4,39	2,77
24.03.2018	4,99		3,00	6,82	6,32		4,29	2,71
25.03.2018	4,78		3,01	6,70	6,24		4,35	2,67
26.03.2018	4,46		3,00	6,68	6,14		4,40	2,61
27.03.2018	4,53		2,94	6,73	6,35		4,22	2,69
28.03.2018	4,76		2,99	6,75	6,36		4,33	2,70
29.03.2018	4,80		3,02	7,14	6,74		4,33	2,80
30.03.2018	5,01		2,98	7,40	6,85		4,61	2,83
31.03.2018	4,83		3,27	7,01	6,46		4,45	2,78
01.04.2018	-		-	6,87	6,41		4,32	2,71
02.04.2018	4,76		3,11	6,84	6,43		4,38	2,69
03.04.2018	4,76		2,99	6,68	6,20		4,32	2,64
04.04.2018	4,79		2,99	6,72	6,36		4,11	2,62
05.04.2018	4,45		3,06	7,24	6,77		4,64	2,70
06.04.2018	4,84		3,06	7,26	6,83		4,30	2,75

На рисунке 4.8 графически показаны зависимости, приведённые в таблице.

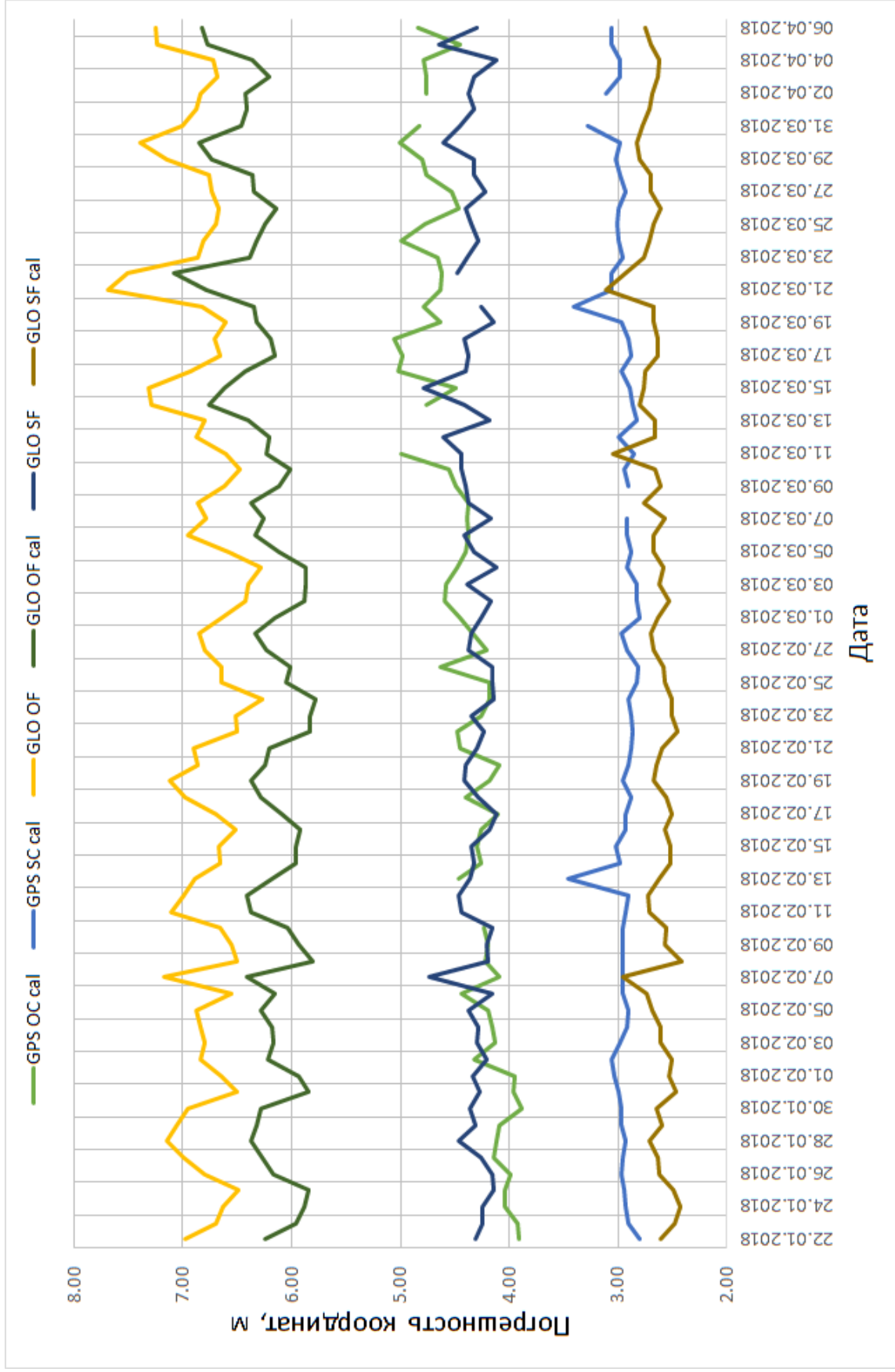


Рис. 4.8 – Границы погрешности определения пространственных координат

Видно, что учет систематической инструментальной составляющей погрешности позволяет существенно снизить погрешность определения координат по сигналам ГЛОНАСС: значения погрешности решения с применением калибровочных поправок меньше аналогичных значений без их применения на каждом суточном интервале за всё время проведения эксперимента. Погрешность определения координат снижена не менее чем на 30% от исходного значения. Точность определения координат по сигналам ГЛОНАСС с санкционированным доступом находится на одном уровне с точностью системы GPS при условии учёта систематических погрешностей измерений псевдодальности и высокоточной ЭВИ.

4.4 Выводы

1. Установлено, что результаты калибровки НАП системы ГЛОНАСС в части систематической инструментальной погрешности измерений псевдодальности в течение года могут изменяться в пределах $\pm 0,1$ м. Указанная стабильность результатов калибровки подтверждена для прецизионных образцов НАП из состава комплексов метрологического обеспечения и калибровки БИС системы ГЛОНАСС при условии поддержания температуры окружающей среды для приёмно-измерительных устройств НАП в пределах $20 \pm 2^\circ\text{C}$.
2. Установлено, что использование калибровочных поправок к результатам измерений псевдодальности аппаратуры сличений эталонов единиц времени и частоты для литеров рабочих частот (от минус 7 до 6) в частотных диапазонах L1 и L2 для сигналов с открытым и санкционированным доступом (итого 56 калибровочных поправок) обеспечивает сличение эталонов, расположенных в одном регионе (на примере Московской области) с погрешностью в пределах ± 1 нс, что соответствует значению погрешности одного из самых точных методов сличений – с использованием перевозимых квантовых часов. Проведены эксперименты с привлечением перевозимых квантовых часов.

зимых квантовых часов из состава ГЭТ 1-2012, подтверждающие достигнувшую точность канала сличений эталонов по сигналам ГЛОНАСС.

3. Разработан программный комплекс, обеспечивающий моделирование алгоритма решения навигационной задачи НАП по сигналам ГЛОНАСС и GPS, а также оценку точности определения местоположения. Программный комплекс основан на обработке измерений первичных навигационных параметров НАП по сигналам ГНСС, апостериорной ЭВИ ГНСС, позволяет учитывать составляющие погрешности измерения псевдодальности, рассчитанные по различным моделям, а также значения инструментальной систематической погрешности измерений НАП, обеспечивает статистическую обработку измерений и визуализацию полученных результатов обработки.
4. Установлено, что использование калибровочных поправок к результатам измерений псевдодальности НАП специальных потребителей ГЛОНАСС обеспечивает повышение точности определения местоположения на 30 %. Показано, что потенциальная точность определения местоположения потребителя по сигналам системы ГЛОНАСС соизмерима с аналогичной точностью определения местоположения потребителя по сигналам системы GPS.

Заключение

В диссертационной работе содержится решение актуальной научной задачи, заключающейся в разработке и исследовании методов и средств измерений для определения инструментальной погрешности измерения текущих навигационных параметров НАП, имеющей важное народно-хозяйственное и оборонное значение. В диссертации получены следующие основные результаты:

1. Разработана схема передачи единицы времени от первичных эталонов единиц величин к НАП при измерении задержки навигационного сигнала. Применение схемы позволяет определять калибровочные поправки к результатам измерений псевдодальности НАП с учетом ее расположения в местах штатной эксплуатации с суммарной стандартной неопределенностью калибровки u_c не более 0,1 м. Это обеспечивает достижение потребителем потенциальной точности определения местоположения и времени по сигналам системы ГЛОНАСС.
2. Разработан метод калибровки имитаторов навигационного сигнала ГЛОНАСС в части систематической погрешности формирования псевдодальности, основанный на использовании многоканального высокочастотного аналого-цифрового преобразования с последующей демодуляцией оцифрованного сигнала и фильтрацией. Достигнутая суммарная стандартная неопределенность калибровки имитаторов в части систематической погрешности формирования псевдодальности не превышает 0,03 м. Это позволяет применять имитатор навигационного сигнала ГЛОНАСС для калибровки НАП.
3. Разработан метод калибровки НАП ГЛОНАСС на основе использования имитатора навигационных сигналов и эталона фазовых параметров антенн,

прослеживаемых к государственным первичным эталонам единиц величин. Достигнутая неопределённость калибровки в части систематической инструментальной погрешности измерения псевдодальности не превышает 0,06 м. Это позволяет использовать калиброванную НАП в качестве эталона для калибровки НАП в месте штатной эксплуатации без прерывания работы.

4. Проведена верификация разработанного метода калибровки НАП и подтверждена сходимость результатов калибровки разработанным методом с дифференциальным методом калибровки по сигналам, излучаемым НКА системы ГЛОНАСС.
5. Установлено, что использование калибровочных поправок к результатам измерений псевдодальности по сигналам ГЛОНАСС аппаратуры сличений эталонов единиц времени и частоты, рассчитанных для каждой литеры рабочей частоты в частотных диапазонах L1, L2 для сигналов с открытым и санкционированным доступом, обеспечивает сличение эталонов с погрешностью в пределах ± 1 нс, что соответствует значению погрешности одного из самых точных методов — с использованием перевозимых квантовых часов.
6. Установлено, что использование калибровочных поправок к результатам измерений псевдодальности НАП специальных потребителей системы ГЛОНАСС обеспечивает повышение точности определения местоположения на 30 %. Показано, что потенциальная точность определения местоположения потребителя по сигналам ГЛОНАСС соизмерима с аналогичной точностью определения по сигналам системы GPS.

Таким образом, цель диссертационной работы, сформулированная как уменьшение погрешности измерения текущих навигационных параметров, вносимой НАП системы ГЛОНАСС, считается достигнутой.

Список литературы

- [1] ГОСТ Р 52928-2010. Система спутниковая навигационная глобальная. Термины и определения. 2010.
- [2] ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Р.В. Бакитько, Е.Н. Болденков, Н.Т. Булавский [и др.]; под ред. Перова А.И., Харисова В.Н. М.: М.: «Радиотехника», 2010.
- [3] Lichtenegger B. H.-W. H. GNSS – Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo and more. Austria: SpringerWienNewYork, 2008.
- [4] Montenbruck Oliver, Steigenberger Peter, Hauschild André. Multi-GNSS signal-in-space range error assessment – Methodology and results // Advances in Space Research. 2018. jun. Т. 61, № 12. С. 3020–3038.
- [5] Subirana J. Sanz, Zornoza J.M. Juan, Hernández-Pajares M. GNSS Data Processing, Vol. I: Fundamentals and Algorithms. Noordwijk: ESA Communications, 2013.
- [6] Пудловский В.Б. Тропосферная задержка: модели и погрешности оценки // Научно-технические серии. Серия "Радиосвязь и радионавигация". 2013. № 3. С. 50–54.
- [7] Ashjaee Javad, Gribkov Mikhail. Satellite signal multipath mitigation in GNSS devices. Патент USA 8717233. 2011.
- [8] GPS/GLONASS System Bias Estimation and Application in GPS/GLONASS Combined Positioning / Junping Chen, Pei Xiao, Yize Zhang [и др.] // China Satellite Navigation Conference (CSNC). 2013.
- [9] Orus-Perez R., Prieto-Cerdeira R. Evaluation and calibration of GNSS receivers for ionospheric delay and scintillation measurements // 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. 2011.

- [10] Review of code and phase biases in multi-GNSS positioning / Martin Hakansson, Anna B. O. Jensen, Milan Horemuz [и др.] // Springerlink.com. 2016.
- [11] GPS, Galileo, QZSS and IRNSS differential ISBs: estimation and application / Dennis Odijk, Nandakumaran Nadarajah, Safoora Zaminpardaz [и др.] // GPS Solutions The Journal of Global Navigation Satellite Systems. 2016.
- [12] Скакун И.О. Разработка метода сравнения шкал времени по сигналам ГЛОНАСС с учетом целочисленного свойства параметров неоднозначности фазовых измерений. Ph.D. thesis: ФГУП «ЦНИИМаш». 2017.
- [13] Федотов В.Н., Печерица Д.С. Калибровка беззапросных измерительных систем ГЛОНАСС с обеспечением прослеживаемости к государственным первичным эталонам единиц величин // Седьмая всероссийская конференция "Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение"(КВНО-2017). Тезисы докладов. СПб: ИПА РАН, 2017. С. 204–205.
- [14] Techniques of antenna cable delay measurement for GPS time transfer / D. Rovera, M. Abgrall, P. Urich [и др.] // 2015 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium the European Frequency and Time Forum. 2015. April. С. 239–244.
- [15] Jiang Z, Lewandowski W. Use of GLONASS for UTC time transfer // Metrologia. 2012. Т. 49, № 1. с. 57. URL: <http://stacks.iop.org/0026-1394/49/i=1/a=009>.
- [16] Langley Richard B. A Primer on GPS Antennas // GPS World. 1998. № 7. С. 50–54.
- [17] Семенов В.А. Влияние рассогласования в линии передачи на стабильность положения амплитудных минимумов фазоманипулированного радиосигнала на оси времени // Метрология в XXI веке. Доклады научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов. Менделеево: ФГУП "ВНИФТРИ 2013. С. 40–46.

- [18] Choi Byung-Kyu, Lee Sang Jeong. The influence of grounding on GPS receiver differential code biases // *Advances in Space Research*. 2018. Т. 62, № 2. С. 457 – 463.
- [19] Schaer Stefan. Overview of Relevant GNSS Biases // *Workshop on GNSS Biases 2012*. 2012.
- [20] Денисенко О.В., Донченко С.И., Ерёмин Е.В. Комплекс эталонов и средств измерений для испытаний аппаратуры потребителей космических навигационных систем ГЛОНАСС и GPS // *Измерительная техника*. 2003. № 2. С. 25–31.
- [21] Развитие системы траекторных измерений на базе использования сигналов GPS/ГЛОНАСС / Дворкин В.В, В.Е. Герцман, В.П. Иванов [и др.] // *Гироскопия и навигация*. 2003. Т. 43, № 4. С. 59–73.
- [22] Метрологическое обеспечение навигационной аппаратуры потребителей сигналов космических навигационных систем ГЛОНАСС и GPS / Ю.С. Яскин, С.И. Донченко, И.Ю. Блинов [и др.] // *Информация и космос*. 2005. № 1. С. 24–28.
- [23] Timing Calibration of a GPS/Galileo Combined Receiver / Blair Fonville, Edward Powers, Rigas Ioannides [и др.] // *Proceedings of the 44th Annual Precise Time and Time Interval*. 2012.
- [24] Petit G. Values and uncertainties of the hardware delays of BIPM geodetic systems and estimation of the type B uncertainty of P3/PPP link calibrations // *BIPM TM.172*. 2009.
- [25] GNSS Time Transfer in the Context of BIPM Activities / G. Petit, J. Leute, D. Piester [и др.] // *5th International Colloquium Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme*. 2015.
- [26] Wouters Michael. GNSS time-transfer equipment // *APMP-MEDEA Workshop / PTB*. 2014.
- [27] Kun Liang. Calibration with NIM calibrator // *APMP DEC Workshop on GPS time-transfer and calibration techniques*. 2016.

- [28] Bauch Andreas. Relative calibration of ESTEC GPS receivers' internal delays: Tech. Rep.: : ESTEC and PTB, 2012.
- [29] International GNSS Service. URL: <http://www.igs.org/>.
- [30] Liu Yanyan, Gu Shengfeng, Li Qingquan. Calibration of GLONASS Inter-Frequency Code Bias for PPP Ambiguity Resolution with Heterogeneous Rover Receivers // Remote Sensing. 2018. № 10. с. 399.
- [31] Montenbruck O., Hauschild A., Steigenberger P. Differential Code Bias Estimation using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps // Journal of Geodesy. 2016. № 90. С. 209–228.
- [32] Schaer Stefan. Biases relevant to GPS and GLONASS data processing // IGS Workshop. 2014.
- [33] The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – Achievements, Prospects and Challenges / Oliver Montenbruck, Peter Steigenberger, Lars Prange [и др.] // Advances in Space Research. 2016. Т. 59, № 7. С. 1671–1697.
- [34] J. B. Neumann M. Bates R. S. Harvey. GLONASS Receiver Inter-frequency Biases – Calibration Methods and Feasibility // ION GPS '99. 1999.
- [35] GPS receiver code bias estimation: A comparison of two methods / Anthony M. McCaffrey, P.T. Jayachandran, D.R. Themens [и др.] // Advances in Space Research. 2017. Т. 59, № 8. С. 1984 – 1991.
- [36] A method of estimating GPS instrumental biases with a convolution algorithm / Qi Li, Guanyi Ma, Weijun Lu [и др.] // Advances in Space Research. 2018. Т. 61, № 6. С. 1387 – 1397.
- [37] Yudanov Sergey, Varyukhin Vyacheslav, Shurygin Nikolay [и др.]. Inter-channel bias calibration for navigation satellite systems. Патент USA 9103912. 2015.
- [38] Комаров Владимир Александрович. Радиоприемное устройство аппаратуры потребителей сигналов глобальных спутниковых навигационных систем. Патент РФ 2551901. 2013.

- [39] Батищев Сергей Николаевич, Борсук Олег Анатольевич, Кириченко Александр Иванович [и др.]. Приёмник аппаратуры потребителей сигналов глобальных спутниковых навигационных систем. Патент РФ 2416102. 2007.
- [40] Федотов В.Н. Оценка погрешностей беззапросных средств измерений ГЛОНАСС // Измерительная техника. 2009. № 1. С. 25–28.
- [41] Блинов И.Ю., Федотов В.Н. Метрологические аспекты создания перспективной системы координатно-временного и навигационного обеспечения России // Измерительная техника. 2009. № 11. С. 33–35.
- [42] С.Н. Карутин. Высокоточное местоопределение по сигналам глобальной навигационной спутниковой системы с использованием уточненной эфемеридно-временной информации // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2010. № 3. С. 42–56.
- [43] Определены погрешности навигационной аппаратуры потребителей в дифференциальной режиме на основе применения имитационного моделирования навигационного поля / Донченко С.И., Денисенко О.В., Насибулин М.Ш. [и др.] // Измерительная техника. 2007. № 11. С. 17–19.
- [44] Лотонов М.А., С.И. Донченко, Федотов В.Н. Оценка погрешности определения псевдодальности в спутниковой радиолокации // Измерительная техника. 2010. № 3. С. 34–36.
- [45] Wanninger Lambert, Sumaya Hael, Beer Susanne. Group delay variations of GPS transmitting and receiving antennas // Journal of Geodesy. 2017. Т. 91, № 9.
- [46] Kersten T., Schön S., Weinbach U. On the impact of Group Delay Variations on GNSS time and frequency transfer // 2012 European Frequency and Time Forum. 2012. April. С. 514–521.
- [47] Баженов Н.Р. Разработка и исследование методов и средств измерений фазовых параметров антенн навигационной аппаратуры потребителя. Ph.D.

- thesis: ФГУП «ВНИИФТРИ». 2017.
- [48] Absolute calibration of a geodetic time transfer system / J. Plumb, K. M. Larson, J. White [и др.] // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2005. Nov. Т. 52, № 11. С. 1904–1911.
- [49] Miller Philip. The Measurement of Antenna Group Delay // The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014). 2014.
- [50] Petit G. Estimation of the values and uncertainties of the BIPM Z12-T receiver and antenna delays, for use in differential calibration exercises // BIPM TM.116. 2002.
- [51] Печерица Д.С., Федотов В.Н. Калибровка беззапросных измерительных систем ГЛОНАСС с обеспечением прослеживаемости к государственным первичным эталонам единиц величин // Седьмая всероссийская конференция "Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение". 2017.
- [52] База данных. Реестр государственных первичных эталонов России по состоянию на 07.06.2018 [Электронный ресурс]. URL: <http://fif.vniiftri.ru/DB/com/index.htm?RU,ETALON> (дата обращения 01.08.2018).
- [53] Absolute calibration of time receivers with DLR'S GPS/GALILEO HW simulator / S. Thaelert, U. Grunert, H. Denks [и др.] // 39th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. 2007.
- [54] P.Waller, D.Schulz, R.Prieto-Cerdeira. A simple and accurate procedure for the absolute calibration of GNSS receivers // Proceedings of the 2017 Precise Time and Time Interval Meeting, ION PTTI 2017. 2017.
- [55] NavX-NCS – The first Galileo/GPS full RF Navigation Constellation Simulator / Guenter Heinrich, Markus Irsigler, Robert Wolf [и др.] // Proceeding of 20th ION GNSS / IFEN. 2007.
- [56] Spirent Communications Plc. Signal generator hardware user manual. 2010.

- [57] ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2. Редакция 5.1. 2008.
- [58] Interface Specification IS-GPS-200J. NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Segment Interfaces. 2018.
- [59] European GNSS (Galileo) open service. Signal-in-Space interface control document. 2016.
- [60] Верещагин А. Н., Голенок А. И., Кокорин В. И. Испытательный стенд имитатора навигационных сигналов МРК-40 // Молодёжь и наука: Сборник материалов VII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 50-летию первого полета человека в космос. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011.
- [61] John Fischer Lisa Perdue. A Calibrated Precision GNSS Simulator for Timing Applications // ION PTTI 2013. 2013.
- [62] Kou Yanhong, Zhang Haitao. Verification Testing of a Multi-GNSS RF Signal Simulator // www.insidegnss.com. 2011.
- [63] Hofmann-Wellenhof Bernhard, Lichtenegger Herbert, Collins James. Global Positioning System: Theory and Practice. Springer Vienna, 2012.
- [64] ГОСТ Р 8.761-2011 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Государственная поверочная схема для средств измерений импульсного электрического напряжения. 2011.
- [65] Rochde&Schwarz. R&S ZVA / R&S ZVB / R&S ZVT Vector Network Analyzers Operating Manual.
- [66] Keysight Technologies Inc. 53220A/53230A 350 MHz Universal Frequency Counter/Timer User's Guide. 2017.
- [67] Кузнецов В.А., Ялунина Г.В. Общая метрология / под ред. В.А. Кузнецова. М.:«ИПК Издательство стандартов», 2001.
- [68] Шаршавин П.В., Кондратьев А.С., Гребенников А.В. Уменьшение погрешности дискретизации псевдослучайной последовательности дальности

- мерного кода с помощью ограничения спектра // Успехи Современной Радиоэлектроники. 2015.
- [69] Teledyne LeCroy, Inc. WaveMaster 8 Zi/Zi-A/Zi-B Oscilloscopes Operator's Manual. 927723 Rev A изд. 2017.
- [70] Воронов А.С. Измерение разности фаз сигналов // Горизонты образования. 2007. № 9.
- [71] Bowman A.W., Azzalini A., Bowman A. Applied Smoothing Techniques for Data Analysis: The Kernel Approach with S-Plus Illustrations. Oxford science publications. Clarendon Press, 1997. URL: https://books.google.ru/books?id=s_hqmAEACAAJ.
- [72] Бобров Н.В. Радиоприёмные устройства. М: "Энергия 1976.
- [73] Адаптивные фильтры: Пер. с англ. / под ред. К. Ф. Н. Коуэна, П. М. Гранта. М.: Мир, 1988.
- [74] Хэмминг Р.В. Цифровые фильтры / под ред. А.М. Трахтмана. М.: Советское радио, 1980.
- [75] ГОСТ Р 54500.3-2011 "Неопределённость измерения. Часть 3: Руководство по выражению неопределённости измерения". 2011.
- [76] Vector Network Analyzer Uncertainty Calculator. Версия 5.0.6.0 от 2017-09-21 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://keysight.com> (дата обращения 01.08.2018).
- [77] Федеральный информационный фонд. Утверждённые типы средств измерений по состоянию на 01.04.2018 [Электронный ресурс]. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4> (дата обращения 01.08.2018).
- [78] Шкирятов В.В. Радионавигационные системы и устройства. Современная радиоэлектроника : библиотека радиоинженера. М.: Радио и связь, 1984.
- [79] Печерица Д.С., Федотов В.Н., Васильев Р.М. Стенд калибровки навигационной аппаратуры ГЛОНАСС. Результаты опытной эксплуатации. // Вестник метролога. 2013. № 4. С. 16–20.
- [80] ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства из-

- мерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. 2011.
- [81] Безменов И.В., Блинов И.Ю. Теоретические основы построения моделей для описания современных шкал времени и стандартов частоты. Менделеево: Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2015. 529 с.
- [82] База данных. Реестр утвержденных эталонов единиц величин по состоянию на 01.08.2018 [Электронный ресурс]. URL: http://fif.vniiftri.ru/DB/com/index.htm?RU,REEST_EV (дата обращения 01.08.2018).
- [83] Борсук О.А. Погрешности определения навигационных параметров приемниками ЗАО «КБ НАВИС» // Радионавигационные технологии в приборостроении. 2012.
- [84] Сличение стандартов частоты и времени обсерваторий "Светлое" и "Зеленчукская" с помощью РСДБ, возимых часов и приемников ГНСС / Вытнов А.В, Жуков Е.Т., Иванов Д.В. [и др.] // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2007. № 17. С. 24–26.
- [85] С.И. Донченко, И.Ю. Блинов, А.С. Гончаров. Состояние и перспективы развития эталонной базы и прецизионных средств измерений координат и времени // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2007. № 16. С. 41–43.
- [86] Kun Liang. Time transfer methods - GNSS // APMP DEC Workshop on Participation in Coordinated Universal Time. 2014.
- [87] Time transfer with nanosecond accuracy for the realization of International Atomic Time / D Piester, A Bauch, L Breakiron [и др.] // Metrologia. 2008. Т. 45, № 2. с. 185.
- [88] Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения земли и ее деятельность по обеспечению потребителей эталонными сигналами частоты и времени и информацией о точном времени / Блинов И.Ю., Гончаров А.С., Пальчиков В.Г. [и др.] // Вестник метролога.

2016. № 4. С. 7–11.
- [89] Russian state time and frequency standard laboratory activities and updates / I. Blinov, Y. Domnin, S. Donchenko [и др.] // Navigation, journal of Institute of Navigation. 2017. № S. С. 62–72.
- [90] Defraigne Pascale, Baire Quentin. Combining GPS and GLONASS for time and frequency transfer // Advances in Space Research. 2011. jan. Т. 47, № 2. С. 265–275.
- [91] Д.Ю. Першин. Сравнительный анализ моделей тропосферной задержки в задаче определения местоположения высокой точности в спутниковых навигационных системах ГЛОНАСС/GPS // Вестник НГУ, Информационные технологии. 2009. Т. 7, № 1. с. 84 – 91.
- [92] Takasu T. RTKLIB ver. 2.4.2 Manual. 2013.
- [93] Малютина К.И., Шевчук С.О. Сравнение бесплатной программы RTKLib с коммерческим программным обеспечением для постобработки ГНСС-измерений // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017.
- [94] Капитонов М.А., Татарченко М.И. GNSSToolkit - новая библиотека для стандартных расчётов в области спутниковой навигации // Геопрофи. 2013.
- [95] GPS and GLONASS combined static precise point positioning (PPP) / D. Pandey, R. Dwivedi, O. Dikshit [и др.] // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016.
- [96] Печерица Д.С., Жилинский В.О. Моделирование решения навигационной задачи по сигналам ГЛОНАСС с учётом систематических погрешностей навигационной аппаратуры потребителя // Вестник метролога. 2018. № 3.
- [97] Lennen Gary R. The USSR's Glonass P-code - Determination and initial results // Proceedings of the 2nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1989). 1989. С. 77 – 83.