

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



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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва, 2018

Работа выполнена в научно-исследовательском отделении разработки и эксплуатации средств метрологического обеспечения координатно-временных и навигационных систем (НАО-8) ФГУП «ВНИИФТРИ».

Научный руководитель:

Денисенко Олег Валентинович, доктор технических наук, заместитель генерального директора - начальник НАО-8 ФГУП «ВНИИФТРИ».

Официальные оппоненты:

Толстиков Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета (НГТУ);

Подрезов Сергей Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского (ВИ (НИ) ВКА им. А.Ф. Можайского).

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (ФГАОУ ВО «СФУ»).

Защита состоится «20» ноября 2018 г. на заседании Диссертационного совета Д 308.005.01 в ФГУП «ВНИИФТРИ», 141570, п/о Менделеево, Солнечногорский район, Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГУП «ВНИИФТРИ».

Автореферат разослан «19» сентября 2018 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

М.В. Балаханов

Общая характеристика работы

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. Для обеспечения конкурентоспособности ГЛОНАСС с зарубежными глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС) погрешность определения местоположения за счет космического сегмента 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 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.

Погрешность определения координат местоположения прямо зависит от погрешности измерений псевдодалности, которая включает погрешность за счёт космического сегмента (ЭВИ), погрешность за счёт задержки радиосигнала в атмосфере, погрешность из-за релятивистских и гравитационных эффектов, многолучевого распространения и инструментальную погрешность измерений псевдодалности навигационной аппаратуры потребителей (НАП).

Для достижения потенциальной точности определения местоположения, которую потребитель может получить при приеме сигналов ГЛОНАСС, необходимо обеспечить значение инструментальной погрешности измерений псевдодальности НАП, существенно меньшее по сравнению с погрешностью измерений за счет ЭВИ, т.е. не более 0,2 м. Эта погрешность носит преимущественно систематический характер и может быть оценена по результатам калибровки.

Под калибровкой НАП здесь и далее понимается совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик, а именно систематической инструментальной погрешности измерения псевдодальности. Исходя из выше обоснованного значения инструментальной погрешности измерения псевдодальности НАП не более 0,2 м следует, что суммарная неопределённость калибровки НАП не должна превышать 0,1 м (расширенная неопределённость калибровки $U \leq 0,2$ м при коэффициенте охвата $k=2$).

К эталонам единиц величин, наиболее близким к измерению задержки навигационного сигнала как интервала времени, могут быть отнесены Государственные первичные эталоны единиц величин (ГПЭ) ГЭТ 1-2018, ГЭТ 207-2013. В то же время технические и функциональные характеристики указанных эталонов при их непосредственном использовании не обеспечивают калибровку НАП с требуемой точностью.

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 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.

Методы и средства измерений для определения погрешностей измерений те-

кущих навигационных параметров НАП 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 текущих навигационных параметров НАП.
3. Разработка метода калибровки НАП системы ГЛОНАСС на основе использования эталонов, прослеживаемых к ГПЭ, 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 ГПЭ 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 ГПЭ, обеспечивает калибровку НАП в части систематической инструментальной погрешности измерения псевдодальности с суммарной стандартной неопределенностью 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 ГЛО-

НАСС 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.

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 и теории погрешности.

Достоверность результатов подтверждается успешной экспериментальной проверкой теоретических выводов по результатам измерений, признанием результатов калибровки НАП Международным бюро мер и весов BIPM.

Результаты работы внедрены при выполнении ОКР «Метрология - 2016», составных частей ОКР «Сантиметр-В», ОКР «КФД-В», ОКР «НСКУ-Н БАМИ».

Практическая значимость результатов заключается в том, что разработанные методы калибровки имитатора навигационных сигналов и НАП системы ГЛОНАСС использовались при создании исходного средства для обеспечения калибровки беззапросных измерительных средств системы ГЛОНАСС, а также НАП специальных потребителей, при калибровке ГЛОНАСС/GPS - приемника частотно-временного назначения TTS-4, принадлежащего Международному бюро мер и весов BIPM, при аттестации рабочих эталонов координат по ГОСТ Р 8.750-2011.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на VII международном симпозиуме «Метрология времени и пространства» (г. Суздаль Владимирской обл., 2014 г.), Международных конференциях «Системный анализ, управление и навигация» (г. Евпатория, республика Крым, 2016, 2017, 2018 гг.), «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.), Всероссийских конференциях «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (г. Санкт-Петербург, 2015, 2017 гг.).

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.

Личный вклад автора. Автор участвовал в постановке научной задачи, формировании частных научных задач. Лично разработал методы калибровки

имитатора навигационных сигналов и НАП системы ГЛОНАСС, провел экспериментальные работы по их апробации, подготовил публикации по теме работы, участвовал в различных международных и всероссийских научных конференциях.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Содержание работы изложено на 123 страницах. Включает 29 рисунков и 8 таблиц. Библиографический список литературы состоит из 97 наименований на 10 листах.

Основное содержание работы

Во введении рассмотрено современное состояние обеспечения единства измерений НАП, а также проведен анализ её метрологических характеристик. Сделан вывод о необходимости уменьшения погрешности измерения псевдодальности навигационной аппаратурой с целью достижения потребителями потенциальной точности определения местоположения при приеме сигналов системы ГЛОНАСС с учётом перспектив её развития. Определены научная задача и цель диссертационной работы.

В первой главе проведён анализ существующих методов и средств оценки инструментальной погрешности измерений псевдодальности НАП, а также разработана схема передачи единицы времени от ГПЭ к НАП при измерении задержки навигационного сигнала (НС).

В результате анализа установлено, что основной причиной инструментальной погрешности измерений псевдодальности НАП являются различные значения задержки НС в приёмном тракте. Эти задержки могут быть приняты постоянными при соблюдении постоянства температуры частотно-зависимых элементов приёмного тракта НАП, отсутствии перекоммутаций, значении коэффициента стоячей волны по напряжению не более 1,5.

Применяемые в настоящее время методы (относительный, схемотехнический, полунатурный) и средства калибровки НАП не позволяют определить

систематическую погрешность измерений псевдодальности НАП с требуемой точностью.

Для решения задачи калибровки НАП в местах штатного размещения без вывода из эксплуатации предложено использовать относительный метод (метод непосредственных сравнений относительно «эталонного» комплекта НАП).

Для калибровки «эталонного» комплекта необходимо разработать метод калибровки, который обеспечит прослеживаемость результатов калибровки к ГПЭ. Принимая во внимание методическую погрешность относительного метода, необходимо обеспечить суммарную стандартную неопределённость калибровки u_C «эталонного» комплекта НАП не более 0,06 м.

Для калибровки «эталонного» комплекта предложен метод полунатурного моделирования с использованием имитатора сигналов ГЛОНАСС и эталона единицы группового времени запаздывания (ГВЗ) в антеннах НАП с последующим расчётом калибровочных поправок для комплекта НАП в целом. Суммарная стандартная неопределённость калибровки антенн НАП в части ГВЗ в настоящее время составляет 0,1 нс, что эквивалентно систематической погрешности псевдодальности 0,03 м. Поскольку неопределённость калибровки «эталонного» комплекта НАП включает в себя неопределённость калибровки антенны и имитатора сигналов ГНСС, то необходимо обеспечить суммарную стандартную неопределённость калибровки имитатора не более 0,03 м.

На рисунке 1 приведена разработанная схема передачи единицы времени от ГПЭ к НАП при измерении задержки навигационного сигнала. Схема показывает прослеживаемость НАП к ГПЭ в части систематической погрешности измерения псевдодальности. Тёмным цветом выделены вновь введенные элементы, отсутствующие в государственной поверочной схеме ГОСТ Р 8.750-2011.

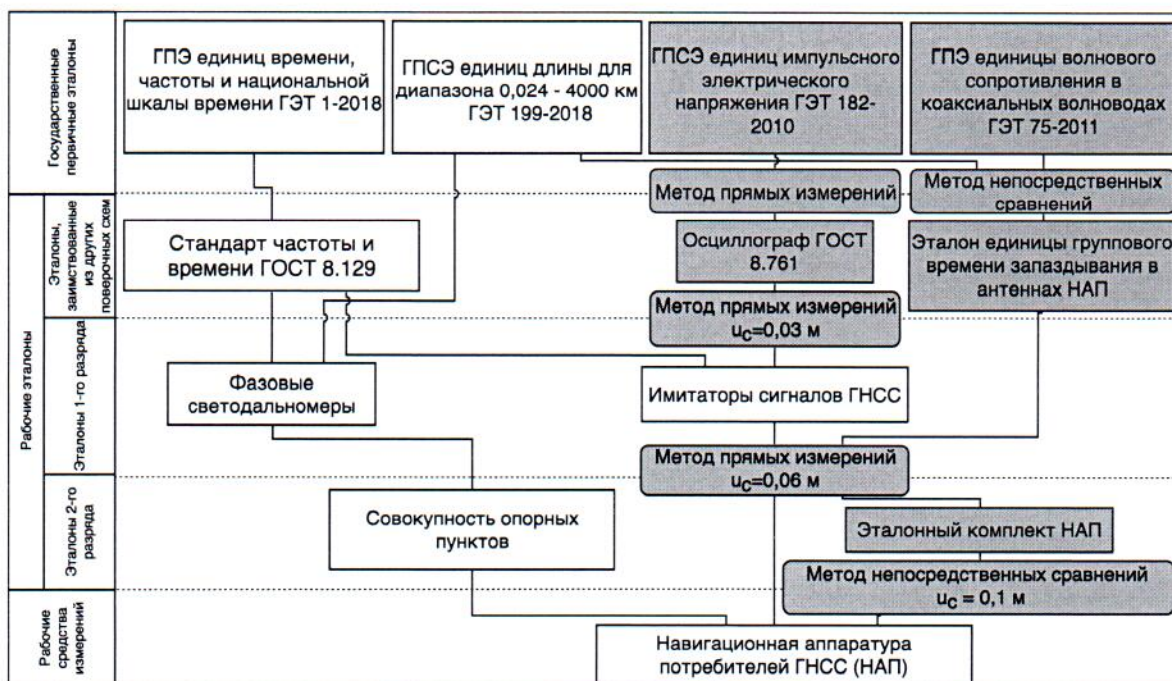


Рисунок 1 – Схема передачи единицы времени от ГПЭ к НАП при измерении задержки навигационного сигнала

Применение этой схемы позволяет 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.

Во второй главе представлены результаты разработки метода калибровки имитатора сигналов ГЛОНАСС, который также может быть распространён на имитаторы сигналов других ГНСС.

Формируемая имитатором сигналов псевдодальность – это интервал времени между событием шкалы времени имитатора и соответствующим событием в формируемом НС. Этот временной интервал можно выразить следующим образом:

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

где T_i – формируемая псевдодальность до i -го НКА,

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 НС в атмосфере, влияние релятивистских эффектов и т.д., рассчитываемые по математическим моделям для i -го НКА,

$\Delta_{\text{им},i}$ – погрешность формирования псевдодальности до i -го НКА.

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 (1) примет следующий вид:

$$T_i = \frac{\Delta_{\text{им},i}}{c} = b_{\text{им},i} + \varepsilon, \quad (2)$$

где $b_{\text{им},i}$ – систематическая составляющая инструментальной погрешности формирования псевдодальности для i -го НКА, выраженная как интервал времени; ε – случайная составляющая инструментальной погрешности формирования псевдодальности, которая принимается как нормально распределённый случайный процесс.

Для калибровки имитаторов сигналов ГНСС в настоящее время применяется метод на основе использования широкополосного осциллографа с поиском минимума амплитуды формируемого НС. Производителями имитаторов сигналов для серийно выпускаемых образцов гарантируется неопределённость калибровки данным методом не более 2 нс. Указанное значение неопределённости обусловлено погрешностями применяемой контрольно-измерительной аппаратуры, влиянием шумов, низкой мощностью сигнала, несовершенством модуляторов имитатора сигналов, наличием двух квадратурных составляющих в НС.

Для решения задачи калибровки имитаторов сигналов с необходимой точностью (не хуже 0,1 нс) предложена демодуляция сформированного НС, при этом демодуляция не должна существенно исказить положение точки перехода фронта импульса модулирующей последовательности через ноль.

Чтобы снизить влияние неравномерности ГВЗ в радиочастотном тракте, предложено использовать аналого-цифровое преобразование на навигационной

частоте. В качестве аналого-цифрового преобразователя (АЦП) возможно использовать высокочастотный цифровой осциллограф с требуемыми метрологическими характеристиками, что обеспечит прослеживаемость результатов измерений к ГПЭ в соответствии с действующей поверочной схемой ГОСТ Р 8.761-2011. К основным требуемым метрологическим характеристикам осциллографа относятся: частота дискретизации не менее 40 ГГц, полоса пропускания не менее 20 ГГц, не менее 2-х каналов.

Схема измерений приведена на рисунке 2.

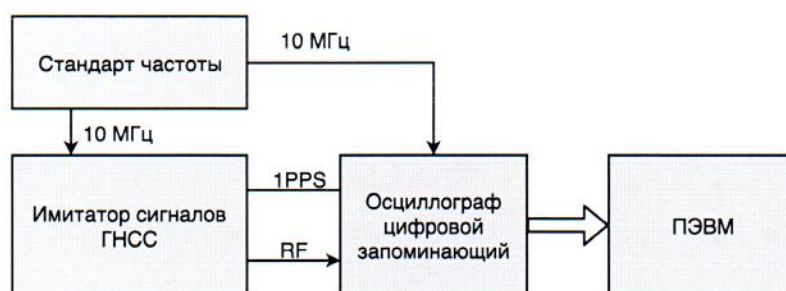


Рисунок 2 – Схема измерений. 1PPS — сигнал секундной метки шкалы времени имитатора сигналов; RF – навигационный сигнал, формируемый имитатором

Алгоритм обработки оцифрованного АЦП навигационного сигнала включает следующие основные этапы: определение начальной фазы и частоты несущей, демодуляция с выделением квадратурных составляющих, фильтрация сглаживающим фильтром МНК 1-го порядка, определение перехода фронта импульса модулирующей последовательности через ноль (отдельно для синфазной и квадратурной составляющих).

Результаты работы алгоритма приведены на рисунке 3. На графике а) показан записанный НС (увеличенный фрагмент с фазовой манипуляцией), на б) светлым показана синфазная составляющая демодулированного сигнала, темной кривой она же после фильтрации. На графике в) показан увеличенный фрагмент фильтрованного сигнала с точкой перехода фронта импульса модулирующей последовательности через ноль.

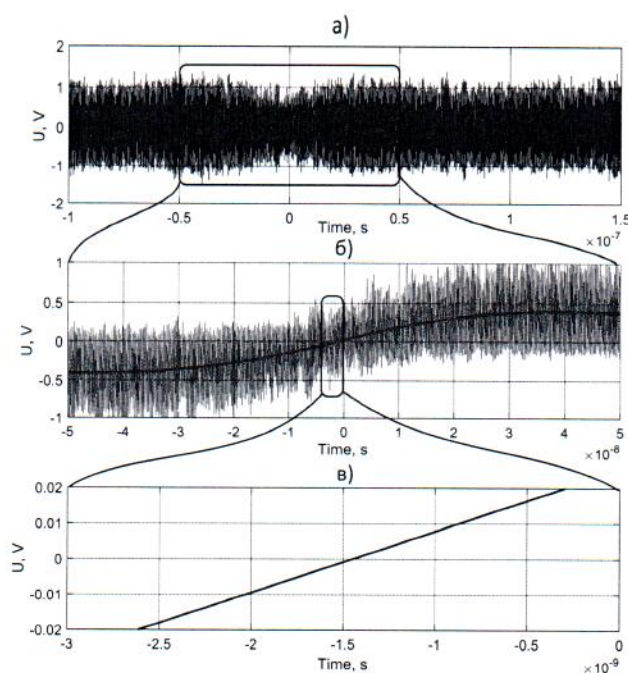


Рисунок 3 – Результаты работы алгоритма демодуляции: а) записанный навигационный сигнал; б) синфазный демодулированный сигнал; в) переход фронта импульса модулирующей последовательности через ноль

Таким образом, достигнута возможность определить момент перехода фронта модулирующей последовательности через ноль с точностью до половины цены деления, то есть половины периода дискретизации осциллографа. Определение момента перехода позволяет измерить интервал времени между секундной меткой имитатора сигналов (она соответствует нулю шкалы времени записанного массива сигнала) и соответствующим моментом в НС.

С учётом задержек во всех кабелях и статистической обработки систематическая инструментальная погрешность формирования псевдодальности определяется по формуле:

$$b_{\text{им},i} = \frac{c}{N} \sum_{j=1}^N (T_i[j] - (\tau_{\text{RF1}} + \tau_{\text{RF2},i}) + \tau_{\text{1PPS}}), \quad (3)$$

где $b_{\text{им},i}$ – систематическая погрешность формирования псевдодальности для i -го НКА;

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

замер,

τ_{RF1} – задержка в кабеле RF,

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

τ_{1PPS} – задержка в кабеле 1PPS.

Бюджет неопределённости калибровки имитаторов сигналов ГНСС в части систематической составляющей инструментальной погрешности формирования псевдодальности как интервала времени приведён в таблице 1.

Таблица 1. Бюджет неопределённости калибровки имитатора сигналов ГЛОНАСС

Источник неопределённости	Тип	Значение входной величины	Вероятностное распределение	Делитель	Кэф. чувствительности	Значение, 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
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 (точная константа).

Для разработанного метода достигнута суммарная стандартная неопределённость калибровки имитаторов в части систематической погрешности формирования псевдодальности не более 0,03 м с прослеживаемостью результа-

тов калибровки к ГПЭ. Достигнутая точность калибровки подтверждена результатами испытаний в целях утверждения типа имитатора сигналов (рег. № 62049-15). По результатам периодической калибровки имитатора сигналов подтверждена стабильность калибровочных поправок при условии поддержания постоянства температуры в пределах $\pm 1^\circ\text{C}$.

В третьей главе приведены результаты разработки метода калибровки НАП в части систематической инструментальной погрешности измерения псевдодальности.

Калибровку НАП в части систематической инструментальной погрешности измерения псевдодальности предложено свести к калибровке отдельных составных частей: антенно-фидерного устройства (АФУ) и приёмно-измерительного устройства (ПИУ), с последующим вычислением суммарных калибровочных поправок всего комплекта НАП.

Калибровка АФУ заключается в измерении ГВЗ для значений рабочих частот ГНСС. Измерения проводятся рабочим эталоном – комплексом аппаратуры для измерения параметров антенно-фидерных устройств, который прослеживается к ГЭТ 199-2018 и ГЭТ 75-2011.

Калибровка ПИУ основана на полунатурном моделировании навигационного сигнала с применением имитатора сигналов ГЛОНАСС. Схема измерений приведена на рисунке 4.

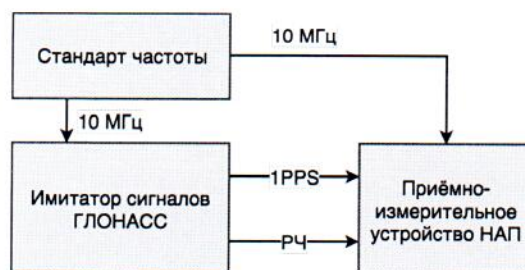


Рисунок 4 – Схема измерений

Псевдодальность, измеренная ПИУ по сигналам имитатора, описывается формулой:

$$R_{\text{ПИУ},k,m}(j) = \rho_k(j) + b_{\text{И},k,m} + b_{\text{ПИУ},k,m} + \varepsilon_{\text{ПИУ}}, \quad (4)$$

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

$\rho_k(j)$ – геометрическая дальность до k -го НКА, формируемая имитатором сигналов,

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

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

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

Шум измерений псевдодальности может быть уменьшен с помощью статистической обработки при проведении измерений на интервале времени наблюдения не менее суток, либо привлечением фазовых измерений.

В этом случае систематическая инструментальная погрешность измерений псевдодальности НАП в целом определяется следующим выражением:

$$b_{\text{НАП},k,m} = b_{\text{АФУ},k,m} \cdot c + b_{\text{ПИУ},k,m} = b_{\text{АФУ},k,m} \cdot c - b_{\text{И},k,m} + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (R_{\text{ПИУ},k,m}(j) - \rho_k(j)), \quad (5)$$

где c – скорость света,

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

$b_{\text{И},k,m}$ – систематическая инструментальная погрешность формирования псевдодальности имитатором сигналов.

По результатам калибровки НАП рассчитываются калибровочные поправки к измерениям псевдодальности для четырёх типов сигналов ГЛОНАСС (с открытым и санкционированным доступом в частотных диапазонах L1 и L2) для 14 литер рабочей частоты, то есть всего 56 калибровочных поправок, а также для сигналов зарубежных ГНСС.

Бюджет неопределённости калибровки НАП приведён в таблице 2.

Таблица 2. Бюджет неопределённости калибровки НАП

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

Таким образом, достигнута суммарная стандартная неопределённость калибровки НАП системы ГЛОНАСС в части систематической инструментальной погрешности измерений псевдодальности не более 0,06 м с прослеживаемостью результатов калибровки к ГПЭ. Достигнутая точность калибровки подтверждена результатами испытаний в целях утверждения типа эталонных комплектов НАП (рег. № 63663-16).

Для обеспечения возможности калибровки НАП без вывода из эксплуатации в месте штатного размещения предложен относительный метод калибровки.

Формула для расчёта систематической инструментальной погрешности измерений псевдодальности при относительной калибровке выглядит следующим образом:

$$b_{H,k,m} = b_{O,k,m} + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N ((R_{H,k,m}(j) - R_{O,k,m}(j)) - (\rho_{H,k}(j) - \rho_{O,k}(j)) - \Delta T(j) \cdot c, \quad (6)$$

где $b_{O,k,m}$ – систематическая инструментальная погрешность измерений псев-

додальности эталонной НАП по m -му типу виду сигналов k -го НКА,
 $R_{H,k,m}(j) - R_{O,k,m}(j)$ – разность измерений псевдодальности калибруемой и эталонной НАП соответственно по m -му типу виду сигналов k -го НКА, в j -й момент времени,

$\rho_{H,k}(j) - \rho_{O,k}(j)$ – разность геометрических дальностей от фазовых центров антенн калибруемой и эталонной НАП соответственно до фазового центра АФУ k -го НКА, рассчитанная с использованием апостериорной ЭВИ ГЛОНАСС.

Таблица 3. Бюджет неопределённости относительной калибровки НАП

Источник неопределённости	Тип	Значение входной величины	Вероятностное распределение	Делитель	Кэф. чувствительности	Значение, м
Погрешность определения координат фазовых центров АФУ	В	0,02 м	Нормальное	1	$\sqrt{2}$	0.02
Систематическая погрешность измерения псевдодальности эталонным комплектом НАП	В	0,06 м	Нормальное	1	1	0.06
Неопределённость измерений разности шкал времени эталонной и калибруемой НАП	В	0,02 нс	Нормальное	1	с	0.006
Случайная погрешность измерений псевдодальности	А	0,06 м	Нормальное	1	1	0.06
Суммарная стандартная неопределённость						0.09
Расширенная неопределённость ($k=2$)						0.18

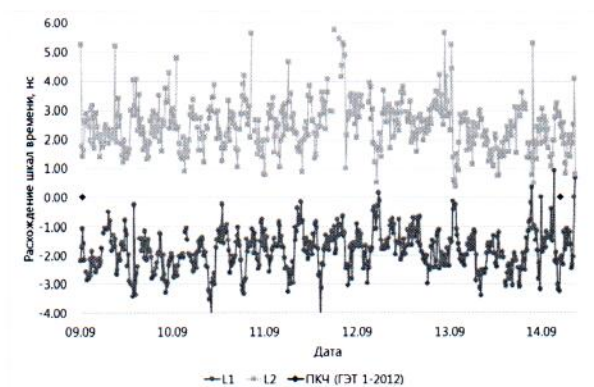
Суммарная стандартная неопределенность калибровки НАП относительным методом с использованием эталонного комплекта НАП и апостериорной ЭВИ ГЛОНАСС не превышает 0,1 м. При этом калибровка НАП может проводиться в местах ее штатной эксплуатации без прерывания работы.

По результатам верификации разработанного метода калибровки НАП с использованием двух эталонных комплектов и апостериорной ЭВИ ГЛОНАСС

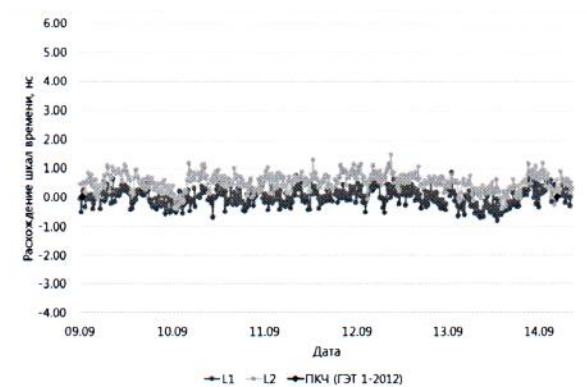
подтверждены значения относительных калибровочных поправок и их стабильность на интервале времени наблюдения восемь суток в пределах $\pm 0,1$ м.

В четвёртой главе проведены исследования влияния учёта результатов калибровки НАП на точность сличений эталонов единиц времени и частоты и определения местоположения по сигналам ГЛОНАСС.

На рисунке 5.а) приведён график расхождений шкал времени удалённых первичного (ГЭВЧ) и вторичного эталонов единиц времени и частоты по результатам обработки измерений эталонных комплектов НАП без учёта калибровочных поправок к измерениям псевдодальности на интервале времени наблюдения пять суток. В качестве опорных измерений использованы измерения расхождения шкал времени с помощью перевозимых квантовых часов (ПКЧ) из состава ГЭВЧ.



а)



б)

Рисунок 5 – Измерения расхождения шкал времени эталонов по сигналам ГЛОНАСС: а) без учёта калибровочных поправок; б) с учётом

Для учёта калибровочных поправок к НАП по сигналам каждого НКА ГЛОНАСС выражение для оценки разности шкал времени эталонов дополнено слагаемым, соответствующим разности значений систематических погрешностей измерений псевдодальности НАП1 и НАП2, которые были определены по ре-

результатам калибровки методом, разработанным в гл. 3:

$$\Delta T(j) = \frac{1}{c \cdot N} \sum_{i=1}^N ((R_i^{\text{НАП1}}(j) - R_i^{\text{НАП2}}(j)) - (\rho_i^{\text{НАП1}}(j) - \rho_i^{\text{НАП2}}(j)) - (b_i^{\text{НАП1}} - b_i^{\text{НАП2}})) \quad (7)$$

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

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

$b_i^{\text{НАП1}}(j)$, $b_i^{\text{НАП2}}(j)$ – систематические погрешности измерений псевдодальности НАП1 и НАП2 соответственно по сигналам i -го НКА.

На рисунке 5.6 приведён график расхождений шкал времени удалённых эталонов по результатам обработки измерений эталонных комплектов НАП ГЛОНАСС с учётом калибровочных поправок к измерениям псевдодальности.

Использование эталонных комплектов НАП ГЛОНАСС позволило снизить систематическую составляющую погрешности измерений до субнаносекундного уровня, что подтверждено средствами первичного эталона (ГЭВЧ).

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

$$P(0,95) = \frac{\sqrt{2} \cdot \Delta_{\text{НАП}} + \Delta_{\text{АТМ}} + \Delta_{\rho} + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_{\text{НАП}}}{c} \approx 1 \times 10^{-9} \text{с}, \quad (8)$$

где $\Delta_{\text{НАП}} \leq 0,12$ м – систематическая погрешность измерений псевдодальности НАП,

$\Delta_{\text{АТМ}} \leq 0,03$ м – погрешность, обусловленная неучтённым отличием состояния атмосферы,

$\Delta_{\rho} \leq 0,02$ м – погрешность определения разности геометрических дальностей от НАП до НКА,

$\sigma_{\text{НАП}} \leq 0,03$ м – случайная погрешность измерения псевдодальности НАП.

Таким образом, установлено, что использование эталонных комплектов НАП обеспечивает сличение эталонов единиц времени и частоты по сигналам ГЛО-

НАСС с погрешностью в пределах ± 1 нс. Это соответствует характеристикам одного из наиболее точных методов сличений – с помощью перевозимых квантовых часов, а также подтверждено результатами испытаний в целях утверждения типа эталонных комплектов НАП (рег. № 63663-16).

Экспериментально оценено влияние учёта калибровочных поправок к измерениям псевдодалности на границы погрешности определения пространственных координат на суточном интервале для НАП, установленной на геодезическом пункте из состава ГЭТ 199-2018. Навигационная задача решена методом наименьших квадратов по кодовым измерениям НАП с учётом высокоточной ЭВИ ГЛОНАСС для НКА с углом возвышения не менее 10° .

На рисунке 6 приведены результаты решения навигационной задачи как разброс погрешностей определения координат в плоскости на интервале времени наблюдения 1 сутки. Центр мишени соответствует действительным значениям координат геодезического пункта.

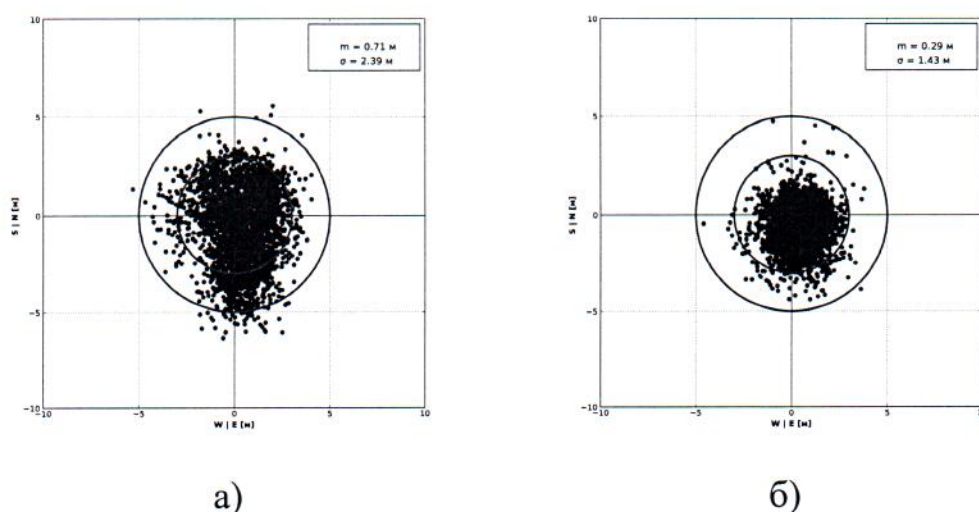


Рисунок 6 – Погрешность определения координат в плане по сигналам ГЛОНАСС: а) без учёта калибровочных поправок; б) с учётом

Учёт калибровочных поправок при работе по сигналам ГЛОНАСС позволяет снизить погрешность определения координат более чем на 30 %. По результатам аналогичной обработки измерений по сигналам GPS выяснено, что точность определения координат по сигналам ГЛОНАСС при условии учёта

калибровочных поправок к измерениям псевдодальности, становится соизмерима с аналогичной точностью определения местоположения потребителя по сигналам системы GPS.

В заключении дана характеристика полученным научным результатам, сделан вывод о решении актуальной научной задачи.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Митрикас В.В., Печерица Д.С., Скакун И.О., Федотов В.Н. Сравнение шкал времени методом PPP по измерениям навигационной аппаратуры потребителей системы ГЛОНАСС // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана.– 2018. – № 4. – с. 32-44.
2. Печерица Д.С., Завгородний А.С., Бурцев С.Ю. Определение опорной точки спутниковой параболической антенны по сигналам навигационных космических аппаратов // Вестник метролога. – 2018. – № 1. – с. 17-21.
3. Куприянов А.О., Майоров А.А., Непоклонов В.Б., Давлатов Р.А., Печерица Д.С., Морозов Д. Оценка влияния инструментальных погрешностей навигационного приемника на точность определения параметров ионосферы // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 6. – с. 31-35.
4. Каверин А.М., Печерица Д.С. Оценка точностных характеристик аппаратуры записи и воспроизведения сигналов космических навигационных систем // Измерительная техника. – 2015. – № 10. – с. 8-11.
5. Денисенко О.В., Сильвестров И.С., Федотов В.Н., Каверин А.М., Печерица Д.С., Воронов В.Л., Рябов И.В., Завгородний А.С. Развитие средств метрологического обеспечения как основа для повышения точностных характеристик системы ГЛОНАСС // Мир измерений. – 2016. – № 3. – С. 13-17.
6. Денисенко О.В., Сильвестров И.С., Каверин А.М., Фролов А.А., Печерица Д.С. Обеспечение единства измерений инерциально-спутниковой навигационной аппаратуры // Вестник метролога. – 2016. – № 1. – С. 11-14.

7. Фролов А.А., Печерица Д.С. Исследование возможности использования лабораторного испытательного оборудования для оценки точностных характеристик бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Вестник метролога. – 2011. – № 1. – С. 18-21.
8. Kaverin A.M., Pecheritsa D.S. Estimating the accuracy characteristics of equipment for recording and playback of signals from spaceborne navigation systems // Measurement Techniques. – 2016. – Т. 58. № 10. – С. – 1090-1094.
9. Печерица Д.С., Бурцев С.Ю. Калибровка наземной измерительной станции ГЛОНАСС с крупноапертурной параболической антенной // Системный анализ, управление и навигация. Тезисы докладов XXIII международной научной конференции. – 2018. – С. 35-36.
10. Федотов В.Н., Печерица Д.С. Калибровка беззапросных измерительных систем ГЛОНАСС с обеспечением прослеживаемости к государственным первичным эталонам единиц величин // Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2017). Тезисы докладов. – 2017. – С. 204-205.
11. Печерица Д.С., Федотов В.Н. Оценка инструментальной погрешности измерений беззапросной дальности навигационной аппаратурой потребителей ГНСС ГЛОНАСС // Системный анализ, управление и навигация. Тезисы докладов XXII международной научной конференции. – 2017. – С. 91-93.
12. Печерица Д.С., Федотов В.Н., Юссуф Ф.О. Калибровка имитаторов сигналов ГНСС // Системный анализ, управление и навигация. Тезисы докладов XXI международной научной конференции. – 2016. – С. 70-72.
13. Denisenko O., Silvestrov I., Fedotov V., Frolov A., Pecheritsa D. Development of GLONASS metrological assurance complex // 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS 2015. – 2015. – с. 1992-1997.