

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

На правах рукописи



Фролов Анатолий Александрович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ УГЛОМЕРНОЙ
НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРОЙ ПОТРЕБИТЕЛЯ ГЛОНАСС

2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Менделеево, 2022 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»).

Научный руководитель:

Денисенко Олег Валентинович, доктор технических наук, заместитель генерального директора ФГУП «ВНИИФТРИ» по координатно - временным измерениям

Официальные оппоненты:

Беркович Сергей Борисович, доктор технических наук, профессор, почетный геодезист РФ, начальник управления навигационно-геодезических систем АНО «Институт инженерной физики», г. Серпухов Московской области

Тяпкин Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры радиотехнических войск ВКС военного учебного центра имени Героя России генерала армии В. П. Дубынина при ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», г. Москва

Защита диссертации состоится «___» декабря 2022 г в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 32.1.004.01 в ФГУП «ВНИИФТРИ» по адресу: 141570, Московская обл., Солнечногорский р-н., р.п. Менделеево.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГУП «ВНИИФТРИ» (www.vniiftri.ru)

Автореферат разослан «___» октября 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

М.В. Балаханов

Общая характеристика работы

Современные задачи, решаемые подвижными объектами на поверхности Земли, акватории мирового океана, воздушном и околоземном космическом пространстве, предъявляют все более высокие требования к точности результатов измерений и эксплуатационным характеристикам технических средств, обеспечивающих потребителей информацией об ориентации объекта в пространстве. Ориентацию объекта однозначно можно описать с помощью трех углов пространственной ориентации (углов Эйлера): курса (рысканья) (α), крена (γ) и тангажа (β) (определения по ГОСТ 20058-80 «Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения»).

Отечественные спутниковые навигационные технологии и услуги с использованием системы ГЛОНАСС постоянно расширяют область своего внедрения. В связи с этим инерциальные навигационные системы (ИНС) всё чаще, с учетом условий применения, результативно заменяются на угломерную навигационную аппаратуру потребителя (УНАП) ГНСС или интегрируются с ней. УНАП – это модификация НАП, имеющая две и более пространственно разнесенных антенны.

НАП классической конструкции (одна антенна) по результатам измерений параметров радионавигационных сигналов от навигационных космических аппаратов (НКА) (задержки по коду (фазе) несущей частоты, доплеровские смещения частот) рассчитывает координаты местоположения и составляющие вектора скорости фазового центра антенны. В УНАП (две и более антенны) за счет возможности расчета в геоцентрической системе координат значений направляющих косинусов векторов антенных баз, попарно соединяющих антенны, появляется дополнительная функция измерения углов пространственной ориентации. Для определения направления на источник навигационного сигнала (НКА) в УНАП использован принцип фазового интерферометра (рисунок 1).

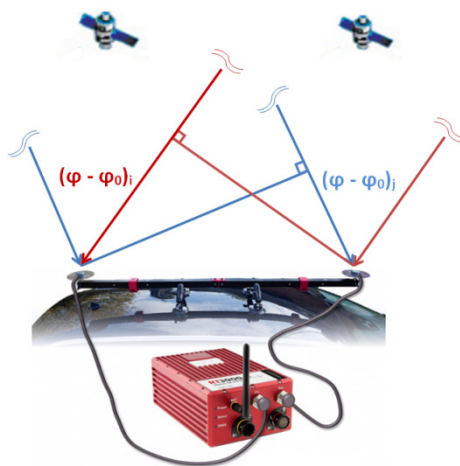


Рисунок 1 – Принцип действия УНАП

Погрешность измерения углов пространственной ориентации УНАП прямо зависит от погрешности измерения разности фаз¹ несущих частот сигналов НКА. Основными составляющими погрешности измерения разности фаз в УНАП являются инструментальная погрешность аппаратуры и влияние многолучевого распространения сигналов НКА. Погрешностями за счет эфемеридной информации НКА, задержки радионавигационного сигнала в атмосфере, релятивистских и гравитационных эффектов можно пренебречь, так как УНАП проводит относительные измерения по фазе несущей частоты сигнала НКА на две и более антенны на короткой базе (единицы метров).

Одновременно с расширением парка УНАП, находящимся в эксплуатации, повышаются требования потребителей к точности измерений углов курса, крена, тангажа (с 36' до 12' (при доверительной вероятности 0,95) на один метр длины антенной базы).

Появление высокоточной УНАП потребовало пересмотра Государственной поверочной схемы (ГПС) для координатно-временных средств измерений и разработки составной части рабочего эталона (РЭ) координат местоположения первого разряда для измерения углов

¹ в соответствии с РТМ 68-14-01 «Руководящий технический материал. Спутниковая технология геодезических работ. Термины и определения» в спутниковой навигации вместо термина «угол фазового сдвига между двумя электрическими сигналами» по ГОСТ Р 8.875-2014 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений угла фазового сдвига между двумя электрическими сигналами в диапазоне частот от 0,1 МГц до 65 ГГц» используется термин «разность фаз несущих частот навигационных сигналов»

пространственной ориентации. Рабочий эталон был создан на базе высокоточного образца угломерной инерциально-спутниковой навигационной аппаратуры, размещенной с использованием специальной оснастки на колесном транспортном средстве. При этом в ГПС для координатно-временных средств измерений отсутствуют эталоны для аттестации составной части РЭ, предназначенного для измерения углов пространственной ориентации.

Средства передачи единицы углов пространственной ориентации УНАП при их непосредственном использовании на различных этапах жизненного цикла аппаратуры (разработки, изготовления, юстировки на объекте, эксплуатации) также не в полной мере соответствуют требованиям потребителей по погрешностям измерений углов пространственной ориентации и своим функциональным возможностям.

Для оценки инструментальных погрешностей навигационной аппаратуры на этапах разработки и изготовления широко применяются имитаторы навигационных сигналов. Для имитаторов сигналов ГНСС с несколькими радиочастотными (РЧ) выходами, конструктивно и функционально предназначенными для оценки точностных характеристик УНАП, в настоящее время нормируется случайная погрешность формирования разности фаз и не нормируется систематическая погрешность.

Из-за конструктивных особенностей большого количества объектов потребителей, размещение на них антенной системы и антенных кабелей УНАП не предусматривает возможность оперативного демонтажа этих элементов аппаратуры. При этом методы и средства оценки точностных характеристик УНАП (составная часть РЭ координат местоположения 1 разряда, наклонно-поворотные стенды, высокоточная интегрированная инерциально-спутниковая аппаратура, средства фазовых измерений приращений координат в реальном времени) не обеспечивают возможность проведения работ без снятия аппаратуры (антенных модулей аппаратуры) с объектов.

Для УНАП (также как и для ИНС), необходима начальная юстировка по углам пространственной ориентации на объекте размещения - оценка пространственной ориентации строительных осей объекта относительно направлений антенных баз (измерительных осей) УНАП. Для обеспечения требуемой погрешности юстировки, результаты измерений УНАП приходится усреднять на продолжительных интервалах времени для уменьшения влияния составляющей погрешности за счет многолучевости. Время начальной юстировки для наиболее прецизионных образцов УНАП, используемых в качестве средств испытаний, в большинстве случаев превышает по продолжительности интервал времени проведения испытаний.

Таким образом, возникает несоответствие требований к определению точностных характеристик УНАП и возможностей существующих методов и средств обеспечения единства координатно-временных измерений.

Методы и средства оценки точностных характеристик УНАП рассматривались в трудах д.т.н. Алешечкина А.М., д.т.н. Фатеева Ю.Л., д.т.н. Перова А.И., д.т.н. Гребенникова А.В. и др. Однако в исследованиях анализу подвергалась в основном случайная составляющая погрешности измерений, а исследуемые типы УНАП имели существенно большее значение систематической составляющей погрешности измерений углов пространственной ориентации по сравнению со значениями, рассматриваемыми в работе. Анализ открытых источников показал, что исследование точностных характеристик высокоточных образцов УНАП без демонтажа с объектов не проводилось, а методы уменьшения систематической погрешности формирования разности фаз имитаторами сигналов ГНСС до рассматриваемых в работе значений не рассматривались.

Целью работы является повышение точности и оперативности измерений углов курса, крена, тангажа угломерной навигационной аппаратурой потребителя ГЛОНАСС.

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

1. Проведен анализ существующих средств измерений и методов уменьшения погрешности измерений углов пространственной ориентации УНАП, методов начальной юстировки УНАП.

2. Уточнена модель погрешности формирования разности фаз несущих частот навигационных сигналов на РЧ-выходах имитатора сигналов ГНСС для определения возможности его использования в качестве рабочего эталона.

3. Разработан метод калибровки имитатора сигналов ГНСС в части систематической погрешности формирования разности фаз несущих частот навигационных сигналов на РЧ-выходах.

4. Разработан метод передачи единицы плоского угла составной части рабочего эталона координат местоположения, применяемого для измерения углов пространственной ориентации.

5. Разработан метод передачи единицы плоского угла УНАП без её демонтажа с объекта в полевых условиях.

6. Разработан метод оперативной начальной юстировки УНАП на объекте испытаний (объекте эксплуатации).

Объектом исследований являются эталоны и высокоточные средства измерений, обеспечивающие уменьшение погрешности измерений углов пространственной ориентации и начальную юстировку УНАП.

Предметом исследования являются методы, обеспечивающие уменьшение погрешности измерений углов пространственной ориентации и начальную юстировку УНАП.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенная модель погрешности формирования разности фаз несущих частот навигационных сигналов на радиочастотных выходах имитатора сигналов ГНСС учитывает составляющие погрешности, обусловленные дискретностью перестройки фазы несущей частоты сигналов и неидентичность частотно-зависимых элементов радиотрактов и обеспечивает:

- обоснование требований к точности метода определения калибровочных поправок к формируемым разностям фаз навигационных сигналов: необходим метод калибровки с расширенной неопределенностью ($k=3$) 1° для существующих типов имитаторов и $0,5^\circ$ для разрабатываемых имитаторов;

- обоснование требований к точностным характеристикам имитатора сигналов ГНСС для уменьшения погрешности измерений углов пространственной ориентации высокоточными образцами УНАП.

2. Метод определения калибровочных поправок к воспроизводимым имитатором сигналов разностям фаз несущих частот сигналов навигационных космических аппаратов с расширенной неопределенностью ($k=3$) 1° .

3. Метод передачи единицы плоского угла без демонтажа угломерной НАП в полевых условиях, основанный на использовании рабочего эталона единицы плоского угла (тахеометра), который обеспечивает определение значений углов курса, крена и тангажа с расширенной неопределенностью ($k=2$) $0,35'$.

4. Метод начальной юстировки УНАП, основанный на применении критерия проверки однородности средних, обеспечивающий снижение продолжительности этой операции в 2 и более раз.

Научная новизна полученных в работе результатов:

1. Разработан новый метод передачи единицы плоского угла рабочим эталонам для координатно-временных средств измерений и УНАП в полевых условиях с использованием высокоточного тахеометра с расширенной неопределенностью $0,35'$, который впервые позволил проводить калибровку рабочего эталона с требуемым значением неопределенности, проводить поверку УНАП без снятия с объектов эксплуатации и обеспечить заданную точность метода начальной юстировки.

2. Предложена расширенная модель погрешности воспроизведения разности фаз несущих частот сигналов НКА имитатором сигналов ГНСС,

учитывающая схемотехнические особенности имитатора, которая позволила увеличить количество оцениваемых составляющих погрешности формируемой разности фаз и, таким образом, обосновать требования к точностным характеристикам имитатора сигналов для использования его в качестве рабочего эталона.

3. Разработан новый метод определения калибровочных поправок к воспроизводимым имитатором сигналов разностям фаз несущих частот сигналов навигационных космических аппаратов в имитаторе сигналов ГНСС с расширенной неопределенностью 1° на базе использования высокочастотного аналого-цифрового преобразователя с последующей демодуляцией оцифрованного сигнала с целью определения разности фаз на участках выборок с линейным изменением фазы.

4. Разработан новый метод начальной юстировки УНАП, который повышает оперативность её проведения более чем в 2 раза и обеспечивает прослеживаемость к государственному первичному эталону единицы плоского угла.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовался математический аппарат линейной алгебры, теории цепей, математической статистики и теории погрешностей.

Результаты работы внедрены при разработке Государственной поверочной схемы для координатно-временных средств измерений (Приказ Росстандарта № 2831 от 29.12.18), Государственного рабочего эталона единиц координат местоположения первого разряда – комплекса эталонного формирования и измерения радионавигационных параметров ЭФИР, ОКР «Метрология-2016», СЧ ОКР «Орт-В», методиках поверки аппаратуры МРК-32, аппаратуры навигационной потребителей глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS «Бриз-КМ» – радионавигационный комплекс морского применения (индекс 14Ц854), УНАП для средств поражения (УНАП-П), УНАП для средств обеспечения,

разведки и АСУВ (УНАП-О), УНАП для использования в составе беспилотных летательных аппаратов (УНАП-Б).

Практическая значимость результатов:

1) Метод измерения разности фаз, формируемой имитатором сигналов ГНСС, используется при поверке составной части рабочего эталона координат местоположения первого разряда - комплекта модернизированной аппаратуры имитации навигационных сигналов ГНСС.

2) Метод начальной юстировки угломерной НАП на объектах потребителей реализован в эксплуатационных документах серийных образцов угломерной НАП для средств поражения (УНАП-П), угломерной НАП для средств обеспечения, разведки и АСУВ (УНАП-О), угломерной НАП для использования в составе беспилотных летательных аппаратов (УНАП-Б).

3) Метод определения углов пространственной ориентации объекта размещения угломерной НАП с использованием тахеометра применяется при поверке составной части рабочего эталона координат местоположения первого разряда - инерциально спутниковой навигационной системы SPAN SE LCI, реализован в ГОСТ РВ 5825–003–2019, ГОСТ РВ 5825–004–2019.

4) Метод передачи единицы плоского угла от эталона плоского угла на базе тахеометра угломерной НАП применяется при поверке угломерной НАП с использованием комплексов навигационных метрологических специального назначения КПА НАП.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на 32 межвузовском научно-техническом семинаре «Основные направления развития радио-электронного вооружения» (г. Санкт-Петербург, Михайловская артиллерийская академия, 2013 г), VII международном симпозиуме «Метрология времени и пространства» (г. Суздаль Владимирской обл., 2014 г.), международной конференции «ION GNSS+» (г. Тампа, США, 2014 г.), научно-технической конференции «Радионавигационные технологии в приборостроении»

(п. Небуг, 2015 г, 2016 г), международной конференции «ENC-2014» (г. Роттердам, Нидерланды, 2014 г), «ENC-2017» (г. Лозанна, Швейцария, 2017), научно-практических конференциях молодых учёных, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке» (Менделеево, ФГУП «ВНИИФТРИ», 2014, 2015, 2017 гг.), II International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (г. Санкт-Петербург-Красноярск, 2021 г).

Материалы опубликованы в 15 публикациях, в том числе в 4 изданиях из перечня ВАК российских рецензируемых изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации.

Личный вклад автора. Автор участвовал в формировании частных научных задач, разработке и апробации метода измерения разности фаз несущих частот навигационного сигнала, формируемого имитатором навигационных сигналов ГНСС.

Автор лично:

- разработал метод передачи единицы плоского угла от рабочих эталонов плоского угла на базе тахеометров к УНАП и провел экспериментальные работы по апробации;
- получил расширенную модель погрешности формирования разности фаз имитатором сигналов ГНСС и провел её исследование;
- разработал метод начальной юстировки УНАП на объектах размещения и провел экспериментальные работы по апробации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Общий объем работы составляет 127 страниц, включающих 53 рисунка и 6 таблиц. Библиографический список литературы состоит из 74 наименований на 9 листах.

Основное содержание работы

Во **введении** рассмотрены требования потребителей к погрешностям измерений углов пространственной ориентации, состояние обеспечения единства измерений УНАП, специфика оценки точностных характеристик аппаратуры на этапах разработки (изготовления), начальной юстировки и эксплуатации. Сделаны выводы о необходимости оценки инструментальной погрешности аппаратуры, оценки точности измерений углов курса, крена и тангажа УНАП без демонтажа с объекта, уменьшения интервала времени начальной юстировки. Определены научная задача и цель диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены структура УНАП и особенности её функционирования в составе объектов, а также проведен анализ существующих методов и средств, используемых для оценки точностных характеристик и начальной юстировки УНАП.

На этапах разработки и изготовления для определения погрешности измерений углов пространственной ориентации УНАП используются углоизмерительные установки (наклонно-поворотные стенды) и имитаторы сигналов ГНСС. Для решения задачи оценки инструментальной погрешности УНАП (без влияния многолучевости) с использованием имитатора сигналов ГНСС, показана необходимость уточнения модели погрешности формирования имитатором сигналов ГНСС разности фаз несущих частот навигационных сигналов. По имеющейся методике измерений (№ ФР.1.33.2016.24673 в реестре аттестованных методик (методов)) нормируется случайная составляющая погрешности формирования разности фаз имитатором сигналов ГНСС и не нормируется систематическая. При этом необходимо обеспечить доверительные границы погрешности (при доверительной вероятности 0,95) формирования разности фаз несущих частот сигналов НКА $(1,8...5,3)^\circ$ (это эквивалентно погрешности формирования углов пространственной ориентации $(4...12)'$ на один метр длины антенной базы. Здесь и далее оценки разности фаз приведены для

сигнала ГЛОНАСС L2 (литера -7) с длиной волны несущей частоты $\lambda = 0,24$ м).

На основе анализа методов оценки точностных характеристик УНАП и начальной юстировки УНАП на объектах размещения, обоснована необходимость разработки нового метода передачи единицы плоского угла с расширенной неопределенностью $U \leq 0,35'$ при коэффициенте охвата 2, нового метода определения калибровочных поправок к воспроизводимым имитатором сигналов разностям фаз несущих частот сигналов навигационных космических аппаратов с расширенной неопределенностью 1° при коэффициенте охвата 3, а также нового метода оперативной начальной юстировки УНАП на объектах потребителей, обладающего требуемой точностью.

Во второй главе приведены результаты разработки и анализа составляющих расширенной модели погрешности формирования разности фаз несущих частот сигналов НКА имитатором сигналов ГНСС.

В соответствии с ГОСТ 8.381-2009 «ГСИ. Эталоны. Способы выражения точности» для вторичных эталонов указывают доверительные границы суммарной погрешности, вычисленные с вероятностью, равной 0,95. Суммарная погрешность образована случайной погрешностью и неисключенной систематической погрешностью (НСП) самого вторичного эталона, случайной погрешностью и НСП вышестоящего эталона и погрешностью передачи единицы величины от вышестоящего эталона вторичному.

Итоговое выражение для доверительных границ суммарной погрешности формирования разности фаз, полученное в диссертационном исследовании, имеет следующий вид (1):

$$\Delta_{(\varphi-\varphi_0)_{(p=0,95)}} = \pm K_{\Sigma} \cdot \sqrt{\frac{(|(\varphi-\varphi_0)_1| + 360^\circ/2^N + |\Theta_1|)^2}{3} + 2s_p^2 + s_1^2}, \quad (1)$$

где $(\varphi-\varphi_0)_1$ - составляющая НСП, обусловленная неидентичностью трактов РЧ-выходов имитатора сигналов ГНСС, градус; Θ_1 – НСП вышестоящего

эталона, используемого для передачи единицы разности фаз имитатору сигналов ГНСС, градус; S_p – СКО результата воспроизведения задержки навигационного сигнала по фазе несущей частоты имитатором сигналов ГНСС, градус; S_1 – СКО результата измерения разности фаз вышестоящим эталоном, градус; N – разрядность кода ЦАП, управляющего формированием фазой несущей частоты в имитаторе сигналов ГНСС; K_Σ – коэффициент, определяемый доверительной вероятностью и отношением случайных погрешностей и НСП.

Значения погрешности формирования разности фаз в зависимости от составляющих суммарной погрешности представлены на рисунке 2 для существующих типов имитаторов сигналов ГНСС и рисунке 3 для перспективных типов имитаторов сигналов ГНСС.

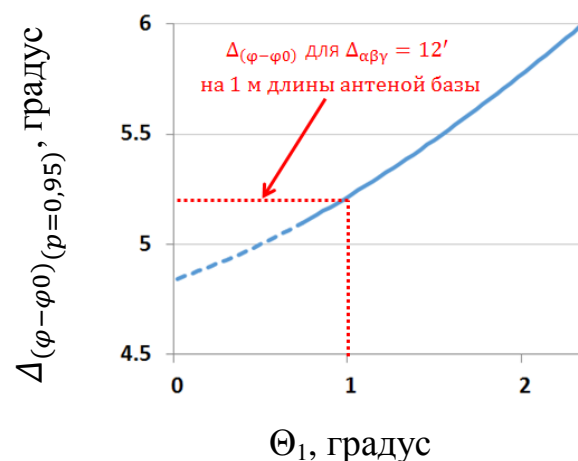


Рисунок 2 – Анализ требований к методу калибровки для используемых типов имитаторов сигналов ГНСС

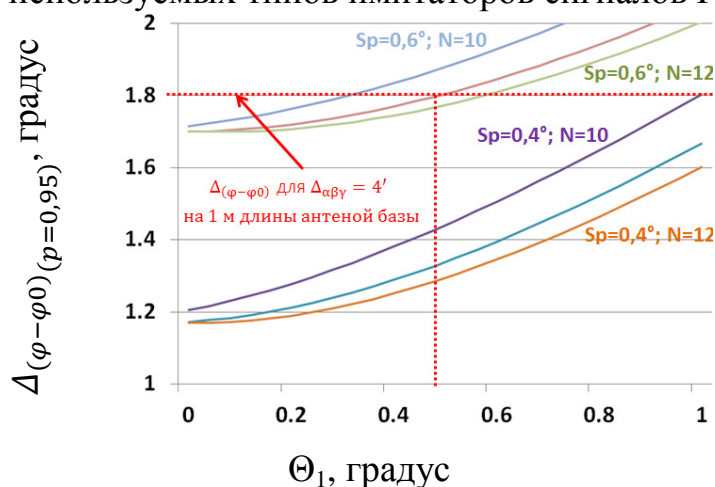


Рисунок 3 – Анализ требований к методу калибровки для перспективных типов имитаторов сигналов ГНСС

Анализ составляющих расширенной модели погрешности формирования разности фаз имитаторами сигналов ГНСС показал следующее:

- для существующих типов имитаторов сигналов ГНСС с несколькими РЧ-выходами (комплект модернизированной аппаратуры имитации навигационных сигналов ГНСС (входит в рег. № 82567-21 в реестре утвержденных типов средств измерений), установки измерительные – имитаторы сигналов прецизионные многофункциональные К2-99 (рег. № 71594-18), установки измерительные – имитаторы сигналов перевозимые К2-100 (рег. № 73017-18)) погрешность формирования разности фаз в $5,3^\circ$ достигается калибровкой имитатора сигналов ГНСС в части систематической погрешности формирования разности фаз, обусловленной $(\varphi - \varphi_0)_1$. Метод калибровки должен иметь расширенную неопределенность ($k=3$) не более 1° . Значение СКО результата формирования задержки по фазе несущей частоты навигационного сигнала $s_p = 0,9$ мм ($1,3^\circ$) получено из технической документации имитаторов сигналов ГНСС, а значения $N = 8$ и $s_1 = 0,1$ мм ($0,15^\circ$) определены экспериментально.

Для перспективных типов имитаторов сигналов ГНСС погрешность формирования разности фаз в $1,8^\circ$ может быть обеспечена при следующих условиях: СКО результата формирования задержки по фазе несущей частоты не более 0,3 мм ($0,6^\circ$), разрядность кода ЦАП, управляющего формированием фазой несущей частоты в имитаторе сигналов ГНСС не менее 11, и использовании метода калибровки имитаторов сигналов ГНСС в части систематической погрешности формирования разности фаз с расширенной неопределенность ($k=3$) не более $0,5^\circ$.

В третьей главе приведены результаты разработки метода калибровки имитатора сигналов в части систематической инструментальной погрешности формирования разности фаз.

Существующие методы измерения разности фаз широкополосных фазоманипулированных навигационных сигналов, такие как метод передачи

относительных приращений фазы от ГЭТ 207-2013 по ГОСТ Р 8.875-2014, применение широкополосного осциллографа (прямой метод измерения разности фаз через анализ осциллограмм), применение двух фазовых геодезических приемников, работающих от общего опорного генератора не обеспечивают требуемого значения погрешности.

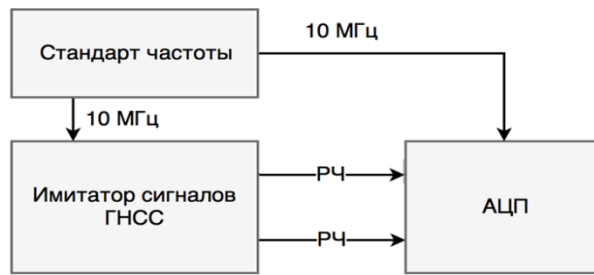
В работе для задержки навигационного сигнала, формируемого имитатором сигналов ГНСС по фазе несущей частоты, принято выражение (2):

$$\rho = 360^\circ \cdot f_i \cdot (R + (T_{\text{НКА}i} - T_{\text{им}}) + \rho_i^{\text{Ion}} + \rho_i^{\text{Trop}} + \rho_i^{\text{МЛР}} + \rho_i^{\text{РГЭ}} + \Delta\rho_i^{\text{ИМ}}), \quad (2)$$

где R – формируемая задержка РЧ-сигнала, эквивалентная геометрической дальности, с; f_i – несущая частота сигнала i -го НКА ГЛОНАСС, Гц; $(T_{\text{НКА}i} - T_{\text{им}})$ – разность шкал времени i -го НКА и шкалы времени имитатора сигналов, с; ρ_i^{Ion} , ρ_i^{Trop} , $\rho_i^{\text{МЛР}}$, $\rho_i^{\text{РГЭ}}$ – формируемые задержки в ионосфере, тропосфере, многолучевость, релятивистские и гравитационные эффекты, с; $\Delta\rho_i^{\text{ИМ}}$ – погрешность формирования задержки РЧ-сигнала по фазе несущей частоты до i -го НКА (инструментальная погрешность имитатора сигналов ГНСС), с.

В случае формирования имитатором сигналов ГНСС с двух РЧ-выходов сигнала одного НКА с нулевой дальностью и нулевыми погрешностями трассы распространения, значение формируемой разности фаз будет равно разности инструментальных погрешностей формирования задержек по фазе несущей частоты.

Предлагаемый метод измерения разности фаз несущей частоты основан на использовании широкополосного осциллографа в качестве аналого-цифрового преобразователя (АЦП) на несущей частоте с последующей передачей массива данных - результатов оцифровки входного сигнала – на внешнюю ПЭВМ для постобработки. Схема измерений показана на рисунке 4.



РЧ – навигационный сигнал, формируемый имитатором сигналов ГНСС

Рисунок 4 – Схема калибровки имитатора сигналов ГНСС

Модель измерений описывается выражением (3):

$$(\varphi - \varphi_0) + (\varphi - \varphi_0)_1 = (\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}} + (\varphi_{\text{каб2}} - \varphi_{\text{каб1}}), \quad (3)$$

где $(\varphi - \varphi_0)$ – значение разности фаз, заданное для формирования в программно-математическом обеспечении имитатора сигналов ГНСС (в разработанном методе равно нулю, т.к. формируется сигнал одного НКА с нулевой дальностью), градус; $(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}}$ – значение разности фаз, измеренное АЦП, градус; $(\varphi_{\text{каб2}} - \varphi_{\text{каб1}})$ – значение разности фаз, обусловленное неидентичностью соединительных кабелей, градус.

Алгоритм обработки включает следующие этапы: запись сигналов, демодуляция с выделением квадратурных составляющих (для поиска интервалов выборки с линейным изменением фазы), вычисление разности фаз на участках исходных выборок с линейным изменением фазы.

Разность фаз сигналов на участках исходных выборок с линейными изменениями фазы вычисляется по формуле (4):

$$(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}} = \arcsin\left(2 \cdot \frac{\overline{S_1 \cdot S_2}}{A_1 \cdot A_2}\right) \quad (4)$$

где $\overline{S_1 \cdot S_2}$ – среднее значение поэлементного усреднения массивов S_1 и S_2 ;

A_1, A_2 – амплитуды сигналов, В.

Так как формула (4) позволяет вычислить разность фаз со знаком в диапазоне $(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2})$, то имитатор сигналов ГНСС должен быть предварительно откалиброван в части определения действительных значений формируемых задержек по фазе дальномерного кода с расширенной неопределенностью $\leq \frac{\lambda}{4}$.

Бюджет неопределенности калибровки имитаторов сигналов ГНСС в части систематической инструментальной погрешности формирования разности фаз приведен в таблице 1.

Таблица 1. Бюджет неопределенности калибровки

Источник неопределенности	Тип	Значение входной величины	Вероятностное распределение	Делитель	Коэф. чувствительности	Значение
Расширенная неопределенность измерения фазы коэффициента передачи соединительных кабелей	B	0,15°	Нормальное	2	1	0,1° (2 кабеля)
Расширенная неопределенность измерения фазы коэффициента отражения разъемов аппаратуры и соединительных кабелей	B	0,17°	Нормальное	2	1	0,24° (4 разъема аппаратуры, 4 кабельных разъема)
Погрешность, обусловленная дискретом осциллографа	B	22,7°	Равномерное	$\sqrt{3 \cdot N}$	1	0,02°
Погрешность измерения амплитуды сигналов осциллографом	B	0,01 В	Равномерное	$\sqrt{3 \cdot N}$	105 °/В	0,01°
Случайная погрешность	A	0,15°	Нормальное	1	1	0,15°
Суммарная стандартная неопределенность						0,3°
Расширенная неопределенность (k=3)						0,9°

Требуемое значение расширенной неопределенности метода достигается при частоте дискретизации 20 ГГц и количестве усреднений $N=4000$. При этом максимальное число усреднений определяется соотношением частоты дискретизации и длительностью элемента (чипа) модулирующей последовательности навигационного сигнала. Например, для сигналов с частотным разделением системы ГЛОНАСС, длительность элемента одной из квадратур сигнала составляет 200 нс.

Достигнутая точность метода калибровки подтверждена экспериментально. Получена сходимость результатов в 0,7° между разработанным методом и результатами измерений Государственного вторичного эталона единиц комплексных коэффициентов передачи в

диапазоне от 0 до минус 60 дБ и комплексных коэффициентов отражений в диапазоне от 0,002 до 1 в диапазоне частот от 0,05 до 65·ГГц (рег. № 2.1.ZZT.0210.2015).

В четвертой главе представлены результаты разработки метода передачи единицы плоского угла от РЭ единицы плоского угла – тахеометра составной части РЭ координат местоположения первого разряда. Метод также может быть использован для определения точностных характеристик УНАП без демонтажа с объекта эксплуатации.

Определение угла курса (α) осуществляется в следующей последовательности:

1) на объекте установки УНАП (или антеннах УНАП) на специальных посадочных площадках размещаются марки отражающие, закрепляющие направления, коллинеарные строительным осям объекта;

2) объект установки УНАП и тахеометр размещаются согласно схеме, приведенной на рисунке 5 так, чтобы обеспечить видимость марок отражательных с места расположения тахеометра;

3) тахеометром измеряются дальности до характерных точек объекта R_1 (TO_1), R_2 (TO_2) и углы в горизонтальной (A_1 , A_2) и вертикальной (Γ_1 , Γ_2) плоскостях.

Значение угла геодезического азимута (A_N), образованного опорным пунктом, местом установки тахеометра и направлением на север, используемое для вычисления угла курса, предварительно измерено с использованием комплекта спутниковой геодезической аппаратуры (СГА). Комплект СГА откалиброван с использованием гиropлатформы геодезической при том же расстоянии между полукомплектами СГА при котором реализуется метод (контролируется тахеометром).

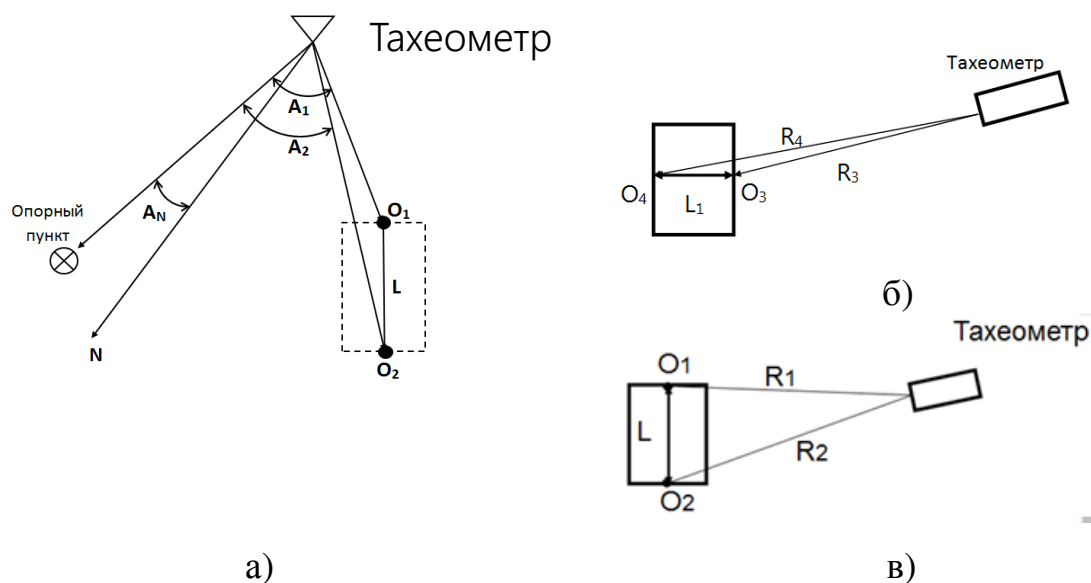


Рисунок 5 –Схемы проведения измерений при определении угла курса (а), крена (б) и тангажа (в) с использованием РЭ плоского угла на базе тахеометра

Результирующее выражение для расчета угла курса имеет вид (5):

$$\alpha = 2\pi - A_2 + A_N + \arcsin \left(\frac{R_1 \cos \Gamma_1}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}} \cdot \sin(A_1 - A_2) \right), \quad (5)$$

где L – расстояние между марками отражающими, м;

A_1, A_2 , – плоские углы, измеренные тахеометром в горизонтальной плоскости, градус; Γ_1, Γ_2 - плоские углы, измеренные тахеометром в вертикальной плоскости, градус; R_1, R_2 – наклонные дальности, измеренные тахеометром до марок отражающих, м.

Аналогично определяются значения углов крена (γ) и тангажа (β) (рисунки 5б и 5в соответственно). Результирующее выражение для расчета угла крена (6):

$$\gamma = \arcsin \left(\frac{R_3 \sin \Gamma_3 - R_4 \sin \Gamma_4}{L_1 \cos \beta} \right), \quad (6)$$

Результирующее выражение для расчета угла тангажа (7):

$$\beta = \arcsin \left(\frac{R_1 \sin \Gamma_1 - R_2 \sin \Gamma_2}{L \cos \gamma} \right), \quad (7)$$

где L_1 – расстояние между марками отражающими, м; $\Gamma_1 - \Gamma_4$ - плоские углы, измеренные тахеометром в вертикальной плоскости, градус; $R_1 - R_4$ – наклонные дальности, измеренные тахеометром до марок отражающих, м.

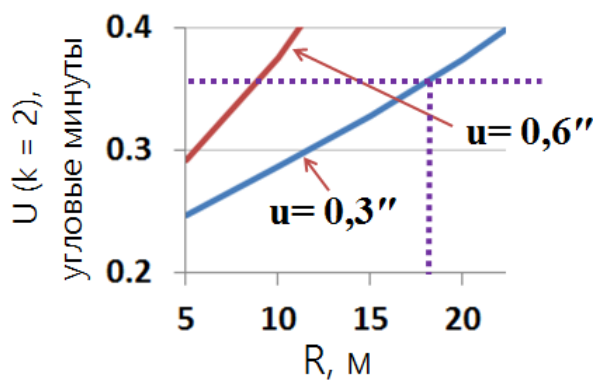
Бюджет неопределенности метода приведен в таблицах 2 и 3 и рисунке 6 при условии использования экземпляров РЭ единицы плоского угла второго разряда с доверительными границами абсолютной погрешности при доверительной вероятности 0,99 измерения плоских углов 0,5" и 1" и при установке марок рефлекторных на расстоянии $L = 1$ м.

Таблица 2. Бюджет неопределенности метода (угол курса)

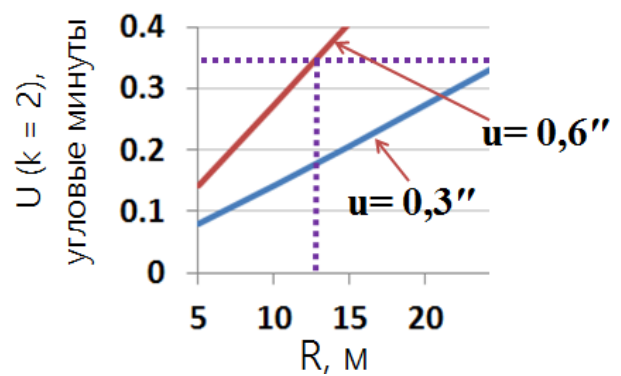
Источник неопределенности	Тип	Значение входной величины	Вероятностное распределение	Делитель	Коэф. чувствительности	Значение
Погрешность измерения азимута гиротеодолитом	B	2,6"	Равномерное	$\sqrt{3}$	1	1,5"
Погрешность измерения уклонения отвесной линии	B	10"	Равномерное	$\sqrt{3}$	1	6"
Погрешность измерения угла A2	B	0,5"/1"	Равномерное	$\sqrt{3}$	1	0,3"/0,6"
Погрешность измерения угла (A1-A2)	B	0,5"/1"	Равномерное	$\sqrt{3}$	$R\sqrt{2}/L$	
Погрешность компенсатора тахеометра	B	1,5"	Равномерное	$\sqrt{3}$	1	1"
Случайная погрешность	A	0,7"/0,9"	Нормальное		1	0,7"/0,9"
Расширенная неопределенность (k=2)						см. рисунок 6а

Таблица 3. Бюджет неопределенности метода (углы крена и тангажа)

Источник неопределенности	Тип	Значение входной величины	Вероятностное распределение	Делитель	Коэф. чувствительности	Значение
Погрешность измерения углов Г1 – Г4	B	0,5"/1"	Равномерное	$\sqrt{3}$	R/L	
Погрешность компенсатора тахеометра	B	1,5"	Равномерное	$\sqrt{3}$	1	1"
Случайная погрешность	A	0,7"/0,9"	Нормальное		1	0,7"/0,9"
Расширенная неопределенность (k=2)						см. рисунок 6б



а)



б)

Рисунок 6 – Расширенная неопределенность ($k=2$) метода определения значений углов курса (а), крена и тангажа (б, в) разработанным методом

Требуемое значение расширенной неопределенности метода ($\leq 0,35'$) обеспечивается тахеометрами в следующих условиях:

в части определения угла курса - при стандартной неопределенности измерения угла тахеометром не более $0,3''$ и на расстояниях между тахеометром и объектом не более 18 м;

в части определения углов крена и тангажа - при стандартной неопределенности измерения угла тахеометром не более $0,6''$ и расстояниях между тахеометром и объектом не более 13 м.

В пятой главе приведены результаты разработки метода начальной юстировки.

Для случая многолучевого распространения сигналов ГНСС при их отражении только от подстилающей поверхности (обеспечивается выбором места проведения измерений), среднее значение периода многолучевости ($T(\varphi - \varphi_0)_M$) для i -го момента времени может быть вычислено по формуле (8):

$$T(\varphi - \varphi_0)_{Mi} = \sum_K \left[\frac{2\pi \cdot L}{K \cdot \lambda} \cdot \sin E_{Ki} \cdot |\dot{E}_{Ki}| \cdot \cos A_{Ki} \right]^{-1}, \quad (8)$$

где A – угол азимута НКА, рад; λ – длина волны несущей частоты, м; L – расстояние между антеннами, м; E – угол места НКА, рад; $\dot{E}$ – производная угла места НКА, рад/с; K – количество видимых НКА.

В работе показано, что для 8-ми суточного интервала времени (интервала повторяемости трасс движения и зон радиовидимости НКА ГЛОНАСС),

среднее значение периода многолучевости в указанных условиях составляет 560 с. Это обстоятельство позволяет снизить влияние медленно меняющейся составляющей погрешности, обусловленной многолучевостью, на итоговую погрешность начальной юстировки за счет накопления результатов измерений на более длительных интервалах (определяется экспериментально для каждого типа УНАП и объекта размещения) и применения критериев проверки однородности средних.

Разработанный метод основан на проверке гипотезы о равенстве средних значений двух частей выборки: $M_{Ni} = M_{Nj}$, при априорно заданной вероятности ошибки первого рода $\alpha = 0,01$.

Для проверки гипотезы о равенстве средних значений был выбран t-критерий Стьюдента, как обладающий наибольшей мощностью из известных критериев при длине выборки более 200 измерений.

Количество измерений УНАП угла пространственной ориентации ($N = N_i + N_j$) (с темпом записи 1 измерение в 1 с), при котором значение составляющей погрешности за счет многолучевости (v) не превышает заданных требований к начальной юстировке (не более 30% от паспортного значения погрешности измерения угла пространственной ориентации УНАП (Δ)), можно найти, используя выражение (9):

$$v(N) = \max(M_N - M_{N_{old}}) \leq 0,3 \cdot \Delta \quad (9)$$

где $M_N = \sum_{i=1}^N \frac{\gamma_i}{N}$ – среднее значение выборки размером N , угловые минуты; γ_i – измеренные УНАП значения угла пространственной ориентации, угловые минуты; $M_{N_{old}} = \sum_{i=1}^{N_{old}} \frac{\gamma_i}{N_{old}}$ – среднее значение выборки размером N_{old} , угловые минуты; N_{old} – количество измерений (интервал времени накопления результатов измерений) при угловой юстировке из документации УНАП. Очевидно, что длительность интервала времени накопления определяется требуемым количеством измерений углов пространственной ориентации при юстировке УНАП.

С помощью разработанного метода начальной юстировки экспериментально подтверждена возможность сокращения времени на эту операцию в два и более раз при сохранении требуемых значений погрешности. Разработанный метод отличается универсальностью применения. Он применим для объектов установки УНАП любых габаритных размеров, а также для угломерных антенных систем любой конструкции и количества антенн.

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

Таким образом, достигнута цель диссертационной работы – повышены точность и оперативность измерений углов курса, крена, тангажа угломерной навигационной аппаратурой потребителя ГЛОНАСС.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Фролов А.А. Метод определения точностных характеристик имитатора сигналов глобальных навигационных спутниковых систем, предназначенного для испытаний угломерной навигационной аппаратуры потребителей // Вестник метролога. – 2018. - №2. - с. 19- 22.
2. Фролов А.А. Методы передачи единицы плоского угла от рабочих эталонов второго разряда государственной поверочной схемы для координатно-временных измерений к угломерной навигационной аппаратуре потребителей // Южно-Сибирский научный вестник. – 2019. – № 2. – с. 187-191.
3. О.В. Денисенко, И.С. Сильвестров, А.В. Мазуркевич, Д.А. Голуб, Д.С. Печерица, А.А. Фролов Изменения в обновленной Государственной поверочной схеме для координатно-временных средств измерений // Альманах современной метрологии – 2019. - №3 (19). - с. 25- 30.
4. Д.С. Печерица, С.Ю. Бурцев, А.А. Фролов «Метод определения дробной части цикла несущей частоты навигационного сигнала имитатора сигналов глобальных навигационных спутниковых систем» // Измерительная техника. 2020. № 11, с. 42 – 48. doi: 10.32446/0368-1025it.2020-11-42-48.
5. Frolov A. A., Denisenko O. V. New method of GNSS attitude navigation receivers initial alignment on the customer's objects //14th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) — 2018. — p. 219–222.
6. A. Frolov. Improvement and automation of the test process of attitude navigation receivers used in the aerospace industry due to the application of GNSS

simulators // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 537 (2019) 032006, doi:10.1088/1757-899X/537/3/032006.

7. Frolov A.A. Ensuring the required accuracy of initial alignment of GNSS attitude navigation receivers on user equipment, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2019, 12(5), p. 555-560, DOI: 10.17516/1999-494X-0076.

8. 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, p. 1992-1997.

9. D. Pecheritsa, S. Burtsev, A. Frolov and V. Fedotov «GNSS-receivers Carrier Phase Calibration» - 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), 2020, pp. 165-169, doi: 10.1109/PIERE51041.2020.9314634.

10. A A Frolov, S Yu Burtsev and D S Pecheritsa. Carrier phase difference measurement method for GNSS-simulator navigation signal // J. Phys.: Conf. Ser., 2021, 1889(4). doi:10.1088/1742-6596/1889/4/042015.

11. Фролов А.А. Метрологическое обеспечение перспективных средств навигационного обеспечения безопасности артиллерийских стрельб и стрельб РСЗО, использующих КНС ГЛОНАСС. 32 межвузовский научно-технический семинар «Основные направления развития радио-электронного вооружения». – СПб: Михайловская артиллерийская академия, часть 1, 2013 г, с. 232 – 233.

12. Фролов А.А. Метод определения точностных характеристик имитатора сигналов космических навигационных систем. II Научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке», р.п. Менделеево, 2014 г., с. 79 – 84.

13. Denisenko, O., Silvestrov, I., Fedotov, V., Frolov, A. Development of GLONASS metrological assurance complex. 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS 2014, 2014, 4, с. 3157–3162.

14. Фролов А.А. Разработка метода начальной установки угломерной навигационной аппаратуры ГЛОНАСС на объектах размещения. III Научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке», р.п. Менделеево, 2015 г., с. 192 – 196.

15. Фролов А.А. Юстировка угломерной навигационной аппаратуры ГЛОНАСС на объектах размещения. Радионавигационные технологии. Вып. 5. Сб. статей / Под ред. А.И. Перова. – М.: Радиотехника, 2016, с. 112- 114.

16. Фролов А.А. Определение погрешностей угломерной навигационной аппаратуры космических навигационных систем методом натурных испытаний. Радионавигационные технологии. Вып. 6. Сб. статей / Под ред. А.И. Перова. – М.: Радиотехника, 2017, с. 75- 77.