

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

Специальность 2.2.10 – Метрология и
метрологическое обеспечение

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Денисенко Олег Валентинович

Менделеево, 2022 г.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. Анализ методов и средств оценки точностных характеристик УНАП на этапах жизненного цикла.....	16
1.1 Особенности конструкции и размещения УНАП на объектах эксплуатации.....	16
1.2 Анализ составляющих погрешности измерений разности фаз несущих частот сигналов ГНСС в УНАП	22
1.3 Анализ требований к погрешностям измерений углов пространственной ориентации	23
1.4 Анализ методов и средств оценки точностных характеристик УНАП на этапе разработки и изготовления.....	24
1.5 Анализ методов и средств оценки точностных характеристик УНАП на этапе эксплуатации	26
1.6 Анализ методов и средств начальной юстировки УНАП на объектах эксплуатации.....	33
1.7 Выводы.....	38
2. Уточнение модели погрешности формирования разности фаз несущих частот навигационных сигналов имитатором сигналов ГНСС	39
2.1 Основные принципы работы имитаторов сигналов ГНСС с несколькими РЧ-выходами.....	39
2.2 Схемотехнические особенности формирования фазы несущей частоты навигационного сигнала имитатором сигналов ГНСС	40

2.3 Экспериментальное исследование по определению дискрета формирования фазы несущей частоты сигнала НКА имитатором сигналов ГНСС	43
2.4 Уточнение модели погрешности формирования разности фаз имитаторами сигналов ГНСС	45
2.5 Анализ уточненной модели погрешности формирования разности фаз имитаторами сигналов ГНСС	47
2.6 Выводы.....	49
3. Метод определения калибровочных поправок к воспроизводимым имитатором разностям фаз несущих частот сигналов ГНСС.....	50
3.1 Анализ методов и средств измерения угла фазового сдвига между двумя электрическими сигналами в L диапазоне частот	50
3.2 Разработка метода измерения разности фаз несущей частоты навигационных сигналов, формируемых имитатором сигналов ГНСС.....	54
3.3 Выводы.....	65
4. Разработка метода передачи единицы плоского угла без демонтажа угломерной НАП в полевых условиях	67
4.1 Размещение геодезических отражателей (марок отражательных) на объекте установки УНАП.....	68
4.2 Определение геодезического азимута направления «тахеометр-опорный пункт»	70
4.3 Порядок проведения измерений и расчет значений углов пространственной ориентации.....	71
4.4 Бюджет неопределенности метода	75
4.5 Выводы.....	86
5. Метод начальной юстировки угломерной навигационной аппаратуры потребителей на объектах размещения.....	87

5.1	Анализ условий проведения измерений.....	88
5.2	Выбор метода проверки однородности средних	90
5.3	Обоснование необходимой длительности интервала измерений УНАП для разработанного метода	92
5.4	Экспериментальное исследование разработанного метода	96
5.5	Выводы.....	98
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	100
	ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ	102
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	103
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	112
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б	121
	ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	125

ВВЕДЕНИЕ

Современные задачи, решаемые подвижными объектами на поверхности Земли, акватории мирового океана, воздушном и околоземном космическом пространстве, такие как: построение цифровых моделей рельефа земной поверхности, получение юридически значимых данных о нарушениях территориальных вод государства, ориентация антенн систем спутниковой связи и др., предъявляют все более высокие требования к точности результатов измерений и эксплуатационным характеристикам технических средств, обеспечивающих потребителей информацией об ориентации объекта в трехмерном пространстве. От точности пространственной ориентации напрямую зависит выполнение задач в области обороны и безопасности государства, в радиолокации, на транспорте, в строительстве, при создании ассистирующих технологий (цифровых карт высокого разрешения) для перспективных систем управления беспилотными транспортными средствами.

Ориентацию объекта в трехмерном пространстве однозначно можно описать с помощью трех углов пространственной ориентации (углов Эйлера): курса (рысканья) (α), крена (γ) и тангажа (β) [1].

На сегодняшний день наиболее распространенным средством предоставления потребителю информации о пространственной ориентации являются инерциальные навигационные системы (ИНС). ИНС обладают важным эксплуатационным свойством автономности функционирования. За более чем полувековую историю применения ИНС на объектах потребителей, для них разработаны методы и средства испытаний, методы ввода в эксплуатацию (методы начальной юстировки на объекте) и периодического контроля точностных характеристик. Однако в последнее время ИНС не всегда удовлетворяют все возрастающим требованиям потребителей по ряду параметров, например, таких как:

- время выдачи первой достоверной измерительной информации о пространственной ориентации объекта после включения ИНС;

- обеспечение требуемой точности оценки углов пространственной ориентации на продолжительных интервалах времени в условиях интенсивного маневрирования.

По этим причинам все больший интерес у пользователей вызывает технология определения углов пространственной ориентации по сигналам навигационных космических аппаратов (НКА) глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), таких как ГЛОНАСС, GPS и других спутниковых радионавигационных систем, а также интегрированный режим ориентирования по сигналам ГНСС и ИНС [2, 3]. Использование ГНСС для определения углов пространственной ориентации требует наличия у навигационной аппаратуры потребителя (НАП) нескольких пространственно разнесенных антенн, принимающих сигналы НКА [4, 5]. Это обеспечивает определение положения потребителя не как материальной точки, а как трехмерного объекта и, в отличие от систем ориентации, построенных на инерциальных чувствительных элементах (гироскопах и акселерометрах), не обладает свойством увеличения систематической погрешности измерения углов пространственной ориентации с увеличением интервала времени проведения измерений углов пространственной ориентации [6, 7].

НАП классической конструкции (одна антенна) по результатам измерений параметров радионавигационных сигналов от НКА (задержки по коду и (или) 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 значений направляющих косинусов векторов антенных баз в геоцентрической системе координат, попарно соединяющих антенны, появляется дополнительная возможность определения углов пространственной ориентации. Для определения направления на источник

навигационного сигнала (НКА) в УНАП положен принцип фазового интерферометра (рисунок 1).

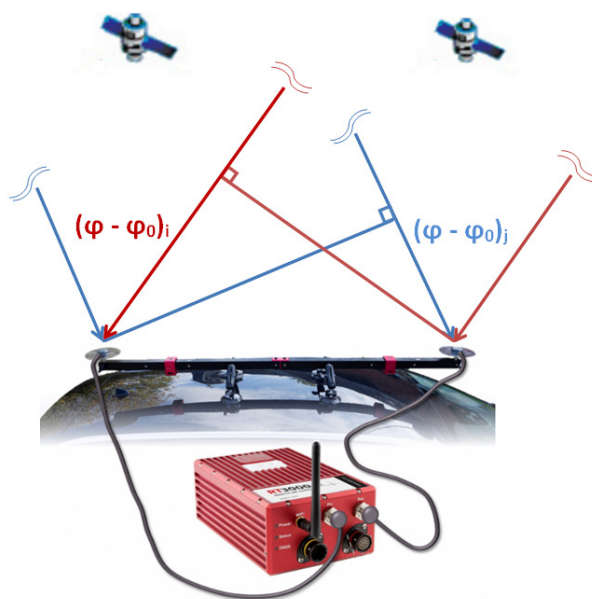


Рисунок 1 – Принцип действия УНАП

Также следует учесть, что Постановлением Правительства Российской Федерации от 25 августа 2008 г № 641 [8] определены порядок и перечень объектов, подлежащих обязательному оснащению НАП. К этим объектам отнесены: воздушные суда государственной, гражданской и экспериментальной авиации, морские суда и суда внутреннего речного и смешанного плавания, автомобильные и железнодорожные транспортные средства, используемые для перевозки пассажиров, специальных и опасных грузов. Таким образом, можно констатировать, что использование УНАП, в случаях, когда необходима информация о пространственной ориентации, имеет устойчивую тенденцию к увеличению количества и типов объектов [67, 68, 69, 70, 71].

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 приемника 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).

За последнее десятилетие уровень требований потребителей к точности информации о пространственной ориентации по сигналам ГНСС значительно возрос. Для выполнения задач обеспечения потребителя информацией о его пространственном положении, поставленных в рамках Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» на 2012 – 2020 годы», потребовалась разработка нового класса аппаратуры – высокоточной УНАП с погрешностями измерений углов пространственной ориентации: 12' (6' для угла курса и 8' для углов крена и тангажа (при доверительной вероятности 0,95) для расстояния между антенными модулями УНАП 1 м) [9]. При этом типовые требования потребителей для этого параметра ранее задавались на уровне $\geq 36'$ ($\geq 12'$ для угла курса, $\geq 24'$ для углов крена и тангажа (при доверительной вероятности 0,95)) [10, 11].

Появление нового класса высокоточной УНАП потребовало пересмотра Государственной поверочной схемы для координатно-временных средств измерений и разработки составной части рабочего эталона (РЭ) координат местоположения первого разряда для измерения углов пространственной ориентации [12].

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»

Для оценки точностных характеристик УНАП на этапах её жизненного цикла необходимы методы и средства, обладающие требуемой точностью (минимум в три раза точнее). При этом должна быть обеспечена возможность:

- оценки инструментальной погрешности УНАП без влияния внешних факторов (в первую очередь многолучевости);
- оценки погрешности в полевых условиях без демонтажа УНАП с объектов размещения (изменение длины антенной базы на 1 мм без проведения повторной юстировки приводит к увеличению погрешности измерения углов пространственной ориентации на 3'). Так, например, из-за конструктивных особенностей ряда объектов размещение на них антенной системы и антенных кабелей УНАП не предусматривает возможность оперативного демонтажа этих элементов аппаратуры.

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, нормируется случайная погрешность формирования разности фаз и не нормируется систематическая погрешность.

Существующие методы оценки точностных характеристик УНАП основаны на использовании специальных измерительных средств (наклонно-поворотные стенды, высокоточная интегрированная инерциально-спутниковая аппаратура) и требуют демонтажа УНАП с объектов размещения. Кроме того, эти методы не позволяют определить систематическую составляющую погрешности измерения углов пространственной ориентации УНАП с требуемой точностью.

Для УНАП (также как и для ИНС) необходима начальная юстировка по углам пространственной ориентации на объекте размещения - оценка пространственной ориентации строительных осей объекта относительно

направления измерительных баз (осей) УНАП [66]. Для обеспечения требуемой погрешности юстировки, результаты измерений УНАП приходится усреднять на продолжительных интервалах времени для уменьшения влияния составляющей погрешности за счет многолучевости. Для наиболее прецизионных образцов угломерной НАП, используемых как средства испытаний, время юстировки достигает 24 ч, что превышает по продолжительности интервал времени проведения работ с использованием этих образцов.

Таким образом, возникает несоответствие требований к определению точностных характеристик угломерной НАП и возможностей существующих методов и средств обеспечения единства координатно-временных измерений, что в целом приводит к невозможности достижения потребителем требуемой точности определения углов пространственной ориентации.

Предпосылками для решения возникшего несоответствия является возможность заимствования рабочих эталонов из других поверочных схем, разработка методов косвенных измерений, запись и обработка навигационных сигналов имитаторов сигналов ГНСС с использованием высокочастотных аналого-цифровых преобразователей.

Методы и средства оценки точностных характеристик навигационной аппаратуры потребителей рассматривались в трудах Перова А.И., Алешечкина А.М., Денисенко О.В., Медведева М.Ю., Фатеева Ю.Л., Гребенникова А.В., Корогодина И.В., Шатилова А.Ю., Пудловского В.Б., Емельянцева Г.И., Блажнова Б.А. и др. [13, 14, 15, 16, 17, 18]. За рубежом эта тема отражена в трудах Alison Brown, Tony Matthews, Lachapelle Gerard, C. Wang и др. [19, 20, 21]). Однако в известных исследованиях анализу подвергалась в основном случайная составляющая погрешности измерения, а исследуемые типы УНАП имели существенно большее значение систематической составляющей погрешности измерений углов пространственной ориентации по сравнению с значениями, рассматриваемыми в работе. Анализ доступных 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 для оценки точности УНАП практически 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 и 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, применяемой 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), 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).

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, г. Красноярск, 2021 г).

Материалы опубликованы в 15 статьях, в том числе в 4 изданиях из перечня ВАК российских рецензируемых изданий.

1. Анализ методов и средств оценки точностных характеристик УНАП на этапах жизненного цикла

1.1 Особенности конструкции и размещения УНАП на объектах эксплуатации

В последнее время УНАП все чаще функционально дополняет, а иногда и заменяет информацию от ИНС на различных объектах. Среди причин предпочтительного использования УНАП по сравнению с ИНС следует отметить следующие: высокая точность расчета навигационных параметров УНАП, в том числе и углов пространственной ориентации; достоверностью определения углов УНАП при работе в высоких широтах; отсутствием накопления систематической составляющей погрешности определяемых параметров с течением времени; сравнительно низкой стоимостью УНАП относительно стоимости ИНС среднего класса точности (например, на волоконно-оптических гироскопах). Использование информации о пространственной ориентации объекта также позволяет определять координаты заданной точки объекта, в которой невозможна установка антенны НАП (что особенно актуально для объектов, обладающих протяженными линейными размерами) [69].

Измерения углов пространственной ориентации, в том числе по сигналам навигационных спутниковых систем, наиболее востребованы в:

- спутниковой связи (для оперативного наведения антенны на спутник связи);
- в авиации (для обеспечения работы радиопеленгаторов авиационного базирования, комплексов аэрофотосъемки, в системах обеспечения летных испытаний пилотажно-навигационного оборудования авиационных объектов [70]) (рисунок 1.1);

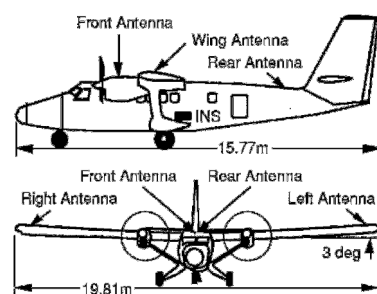


Рисунок 1.1 – Варианты применения УНАП в авиации

- в составе объектов морского флота (для определения величины уклонения судна относительно оси фарватера с отображением параметров движения, при плавании в условиях стесненного маневрирования и пр.) [69], [71] (рисунок 1.2);

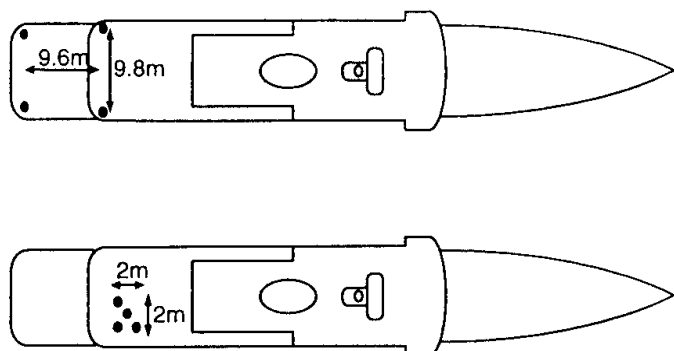


Рисунок 1.2 - Варианты применения УНАП в составе объектов морского флота

- для ориентации и сближения изделий ракетно-космической техники [72];

- в строительстве (рисунок 1.3);



Рисунок 1.3 - Варианты применения УНАП в составе колесных и гусеничных транспортных средств

- при испытаниях систем ориентации и навигации подвижных объектов (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 - Варианты применения УНАП в составе мобильных лабораторий

В качестве примера конструкции УНАП отечественной разработки на рисунке 1.5 показан внешний вид аппаратуры типа «Бриз-КМ» - радионавигационный комплекс морского применения.



Рисунок 1.5 – Внешний вид аппаратуры навигационной потребителей глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS «Бриз-КМ» - радионавигационный комплекс морского применения

УНАП «Бриз-КМ» предназначена для измерения текущих навигационных параметров по сигналам НКА и определения на их основе координат, скорости, углов пространственной ориентации, а также для синхронизации внутренней шкалы времени к шкалам координированного времени. Блок навигационный угломерный аппаратуры обеспечивает прием, выделение информации НКА, измерение навигационных параметров, решение навигационной задачи, включая определение углов пространственной ориентации.

В качестве примера конструкции УНАП иностранного производства на рисунке 1.6 показан внешний вид приемника навигационного Trimble SPS461.



Рисунок 1.6 – Внешний вид приемника навигационного Trimble SPS461

Конструктивно УНАП могут состоять:

- из нескольких (по количеству антенн в конструкции) навигационных плат, работающих от общего генератора опорной частоты и шкалы времени (в качестве примера на рисунке 1.7 приведена структурная схема судового комбинированного приемоиндикатора ГНСС ГЛОНАСС и GPS с дополнительной функцией определения углов пространственной ориентации «Фарватер РК-2106» [73]);

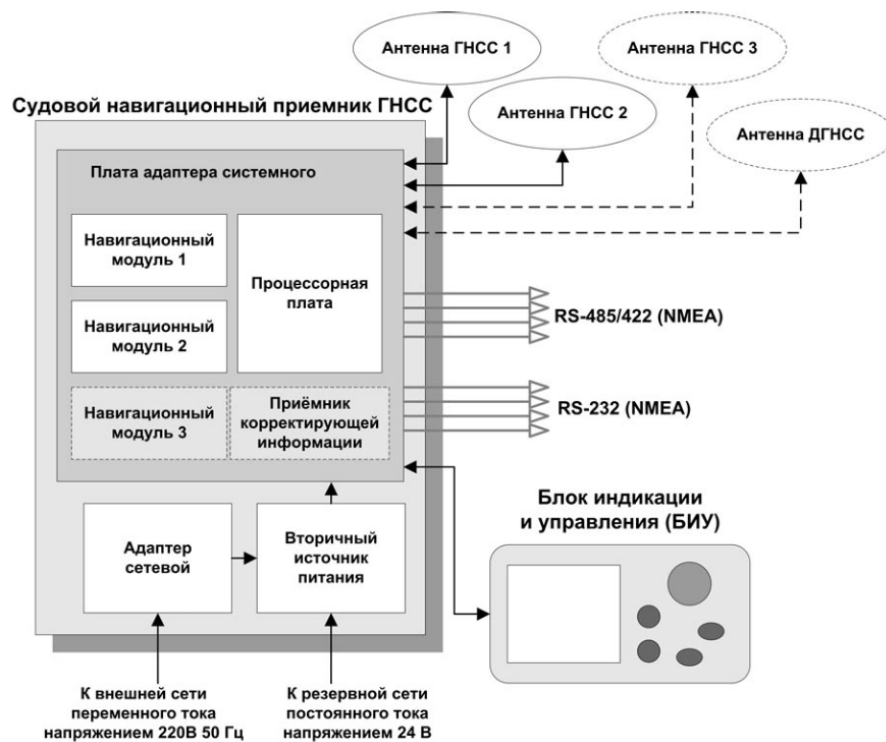


Рисунок 1.7 – Структурная схема УНАП «Фарватер РК-2106»

Для сравнения на рисунке 1.8 показан внешний вид навигационного приемника NT1065 производства фирмы NTLab [74]. Эта УНАП выполнена в виде одной платы с четырьмя РЧ-разъемами для подключения антенн.

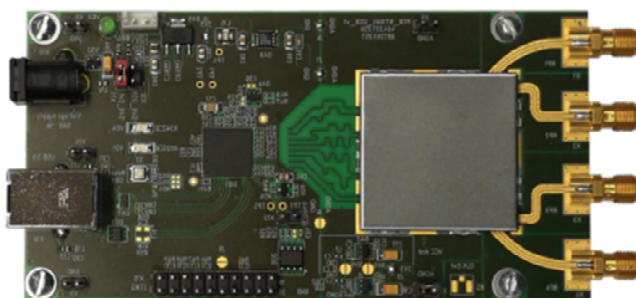


Рисунок 1.8 – Внешний вид УНАП NT1065 (без корпуса)

На рисунке 1.9 [74] показана структурная схема радиотехнической части аппаратуры NT1065.

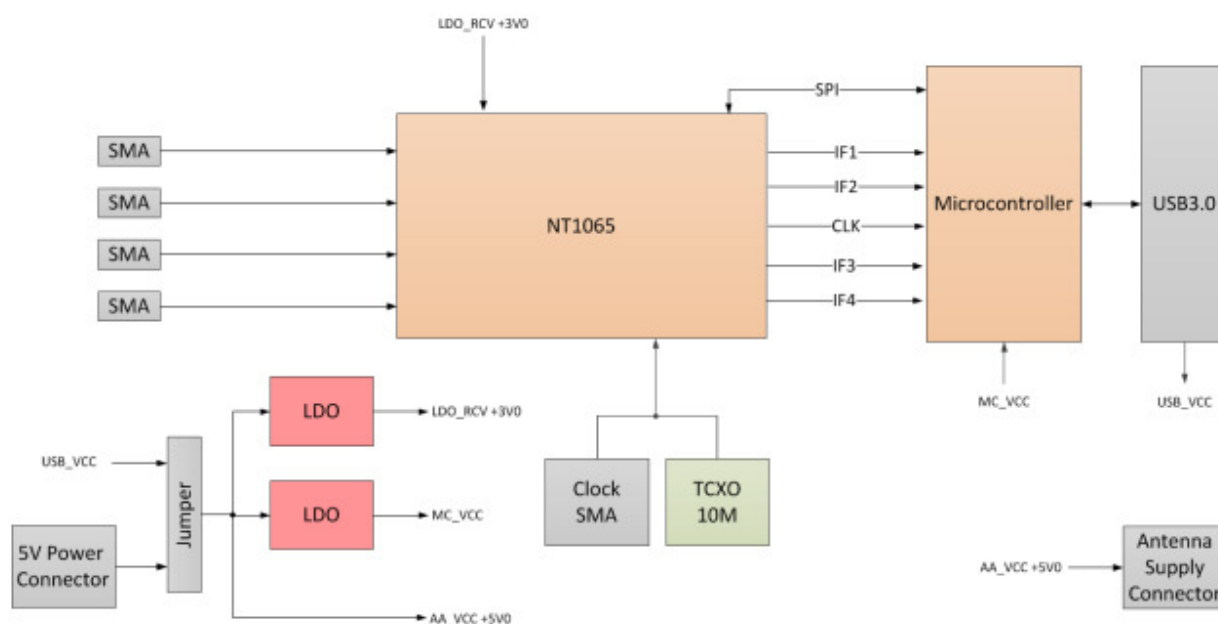


Рисунок 1.9 – Структурная схема УНАП NT1065

Сигналы НКА через антенны и антенные кабели (не показаны на рисунке) поступают на РЧ разъемы типа SMA на плате навигационной. После преобразования сигналов ГНСС в АЦП они поступают в блок процессора, где проводится первичная и вторичная обработка навигационных параметров сигналов. В аппаратуре присутствуют

частотно-зависимые элементы, влияющие на задержку широкополосного навигационного сигнала, вычисляемую УНАП по фазе несущей частоты.

1.2 Анализ составляющих погрешности измерений разности фаз несущих частот сигналов ГНСС в УНАП

Углы курса, крена, тангажа рассчитываются УНАП из значений направляющих косинусов векторов антенных баз аппаратуры в геоцентрической системе координат. Направляющие косинусы определяются по результатам измерений разности фаз несущих частот НКА, принятых антеннами УНАП [22, 23] (рисунок 1.10).

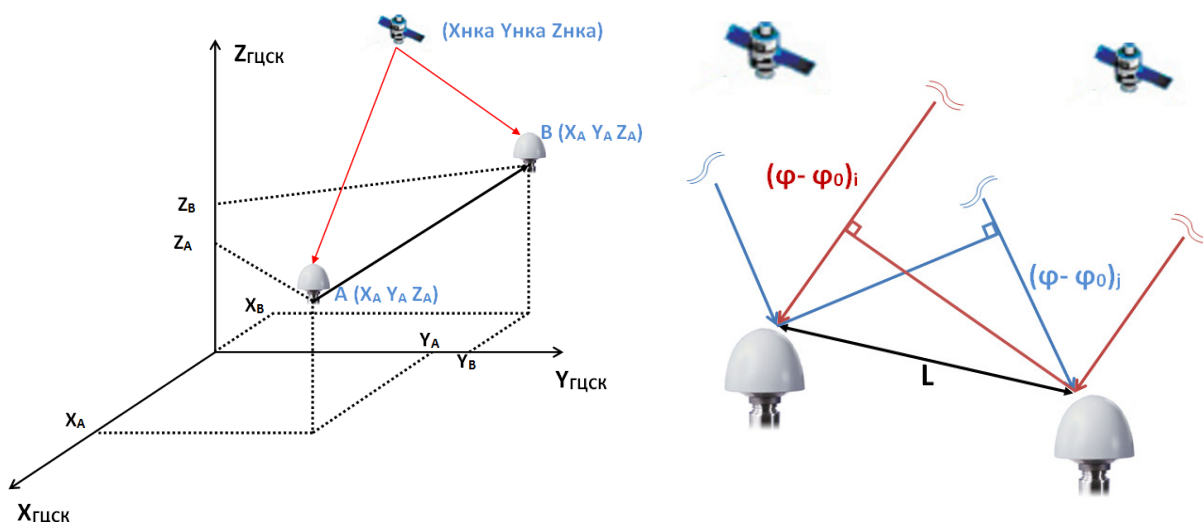


Рисунок 1.10 – Принцип действия УНАП

Погрешность измерения углов пространственной ориентации вычисляется по формуле [23, 24]:

$$\Delta_{\alpha\beta\gamma} = \frac{\lambda \cdot \Delta_{(\varphi-\varphi_0)}}{2\pi L} \cdot \Gamma\Phi$$

где $\Delta_{(\varphi-\varphi_0)}$ – погрешность измерения разности фаз несущей частоты сигнала НКА, градус;

λ – длина волны несущей частоты сигнала НКА, м;

L – расстояние между антеннами УНАП (длина антенной базы), м;

ГФ или ADOP (Attitude Dilution of Precision) – геометрический фактор пространственной ориентации (безразмерная величина).

Геометрический фактор зависит от видимой спутниковой группировки (далее в расчетах $ГФ = 1$, что обычно выполняется при наблюдении одновременно более 6 НКА).

Основными составляющими погрешности измерения разности фаз в УНАП являются инструментальная погрешность приемника и влияние многолучевого распространения сигналов НКА. Другими составляющими погрешности измерений времени распространения сигнала ГНСС, такими как ошибки эфемеридно-временной информации НКА, задержки радионавигационного сигнала в атмосфере, влияние релятивистских и гравитационных эффектов можно пренебречь. Значение этих составляющих погрешности измерения задержки по фазе несущей частоты сигнала НКА практически совпадают при проведении относительных измерений для двух и более антенн на короткой базе (единицы метров) [7, 22].

На УНАП нормируют погрешность измерения углов пространственной ориентации без влияния многолучевости (инструментальную погрешность) [9, 33, 34, 35, 36]. Погрешность начальной юстировки УНАП на объектах является дополнительной составляющей систематической погрешности измерения углов пространственной ориентации УНАП в составе объекта размещения (выполняется по согласованной с Заказчиком методике) и не зависит от инструментальной погрешности измерения разности фаз УНАП.

1.3 Анализ требований к погрешностям измерений углов пространственной ориентации

Предел погрешности определения углов пространственной ориентации составной частью РЭ координат местоположения 1 разряда установлен на уровне 1' [12].

Текущие требования потребителей к погрешности измерения углов пространственной ориентации установлены на уровне $(12...36)'$ (при доверительной вероятности 0,95) на 1 м длины антенной базы [9, 10, 11].

Таким образом, для обеспечения единства измерений УНАП необходимо разработать:

- метод передачи единицы плоского угла от заимствованного РЭ единицы плоского угла составной части РЭ координат местоположения с расширенной неопределенностью $U \leq 0,35'$ при коэффициенте охвата $k=2$;

- метод оценки точностных характеристик УНАП с погрешностью $(4...12)'$ (эквивалентно погрешности воспроизведения разности фаз $(1,8...5,3)^\circ$) (при доверительной вероятности 0,95).

Здесь и далее в работе все расчеты погрешностей измерения углов пространственной ориентации проведены для сигнала ГЛОНАСС в диапазоне L2 (литера -7) с длиной волны несущей частоты $\lambda = 0,24$ м.

1.4 Анализ методов и средств оценки точностных характеристик УНАП на этапе разработки и изготовления

Для оценки инструментальных погрешностей НАП на этапах разработки и изготовления широко применяются имитаторы навигационных сигналов ГНСС. Для определения характеристик УНАП необходим имитатор сигналов ГНСС с несколькими радиочастотными выходами (по количеству антенн УНАП).

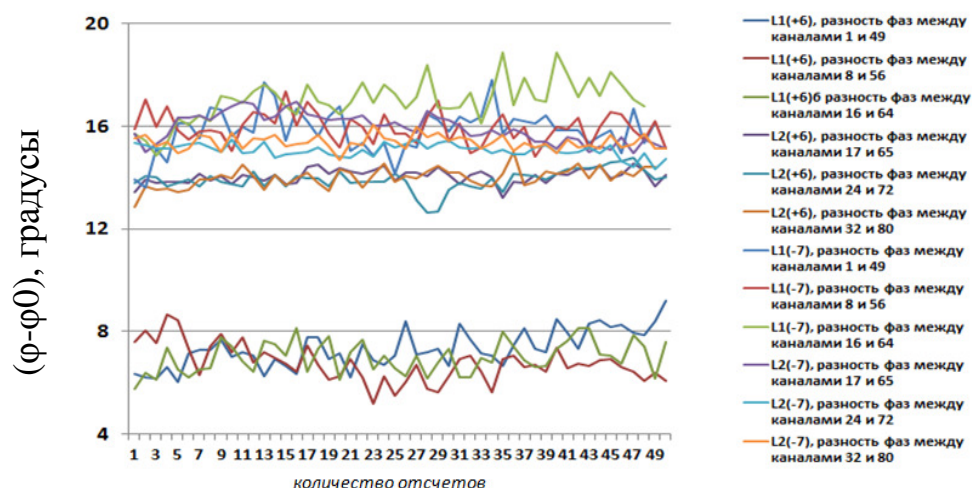
В настоящее время разработаны несколько типов имитаторов сигналов ГНСС, предназначенных для оценки инструментальных погрешностей измерений углов пространственной УНАП: комплект модернизированной аппаратуры имитации навигационных сигналов ГНСС (АИНС-М), установки измерительные – имитаторы сигналов перевозимые К2-100 и другие [18, 25, 26]. Имитаторы сигналов ГНСС обеспечивают определение инструментальных погрешностей измерений НАП, снижают стоимость и обеспечивают воспроизводимость условий проведения испытаний.

В соответствии с аттестованной «Методикой измерений углов пространственной ориентации угломерной навигационной аппаратурой потребителей с использованием имитатора сигналов глобальных навигационных спутниковых систем» (№ ФР.1.33.2016.24673 в реестре аттестованных методик (методов) измерений) [27], в настоящее время для имитаторов навигационных сигналов нормируется только среднее квадратическое отклонение (СКО) результата формирования разности фаз ($s_{(\varphi-\varphi_0)}$) (1.1):

$$s_{(\varphi-\varphi_0)} = s_p \sqrt{2} \quad (1.1)$$

где s_p – СКО результата воспроизведения задержки радионавигационного сигнала по фазе несущей частоты, градус.

При этом значения необходимых систематических поправок к формируемым разностям фаз по результатам экспериментальных исследований, проведенных в отделе метрологического обеспечения навигационных и радиотехнических измерительных средств ГЛОНАСС ФГУП «ВНИИФТРИ», могут достигать десятков градусов для разных литер НКА ГЛОНАСС (рисунок 1.11).



количество измерений (N)

Рисунок 1.11 – Типовые значения разностей фаз сигналов ГЛОНАСС, формируемых имитатором сигналов ГНСС отечественного производства

Систематическая погрешность формирования разности фаз зависит, в первую очередь, от неидентичности трактов имитатора сигналов ГНСС. Принимая систематическую погрешность формирования разности фаз постоянной величиной (в нормальных условиях), она может быть определена в результате калибровки имитатора и учтена.

1.5 Анализ методов и средств оценки точностных характеристик УНАП на этапе эксплуатации

В Государственной поверочной схеме (ГПС) для координатно-временных средств измерений (ГОСТ 8.750-2011) до 2018 г применялся метод с использованием средств фазовых измерений приращений координат в реальном времени (фрагмент ГПС представлен на рисунке 1.12).

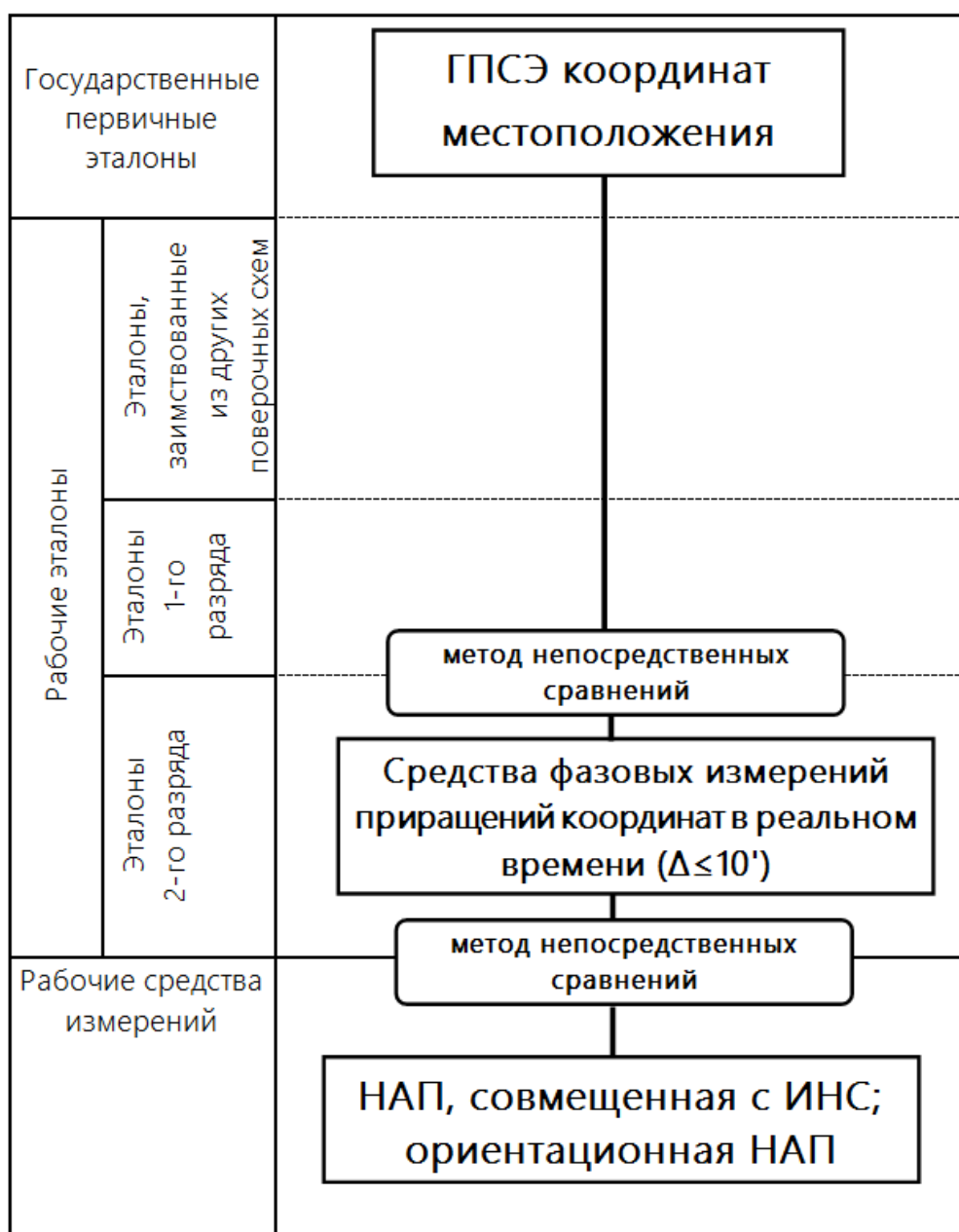


Рисунок 1.12 – Фрагмент ГПС для координатно-временных средств измерений (ГОСТ 8.750-2011)

Так как наиболее прецизионные средства фазовых измерений приращений координат в реальном времени (более распространенное название - спутниковая геодезическая аппаратура) имеют погрешность измерения длины базисной линии 3 мм на расстояниях до 1 км, то погрешность измерения угла пространственной ориентации указанным методом не может быть меньше $10'$ на 1 м длины антенной базы. Необходим

демонтаж антенн УНАП или размещение полуккомплектов спутниковой геодезической аппаратуры коллинеарно измерительной оси УНАП.

Появление высокоточных образцов УНАП (с погрешностью измерений углов пространственной ориентации на уровне $(6...8)''$ на 1 м длины антенной базы) потребовало пересмотра ГПС для координатно-временных средств измерений [12] (рисунок 1.13) и разработки составной части РЭ координат местоположения, предназначенного для измерения углов пространственной ориентации.

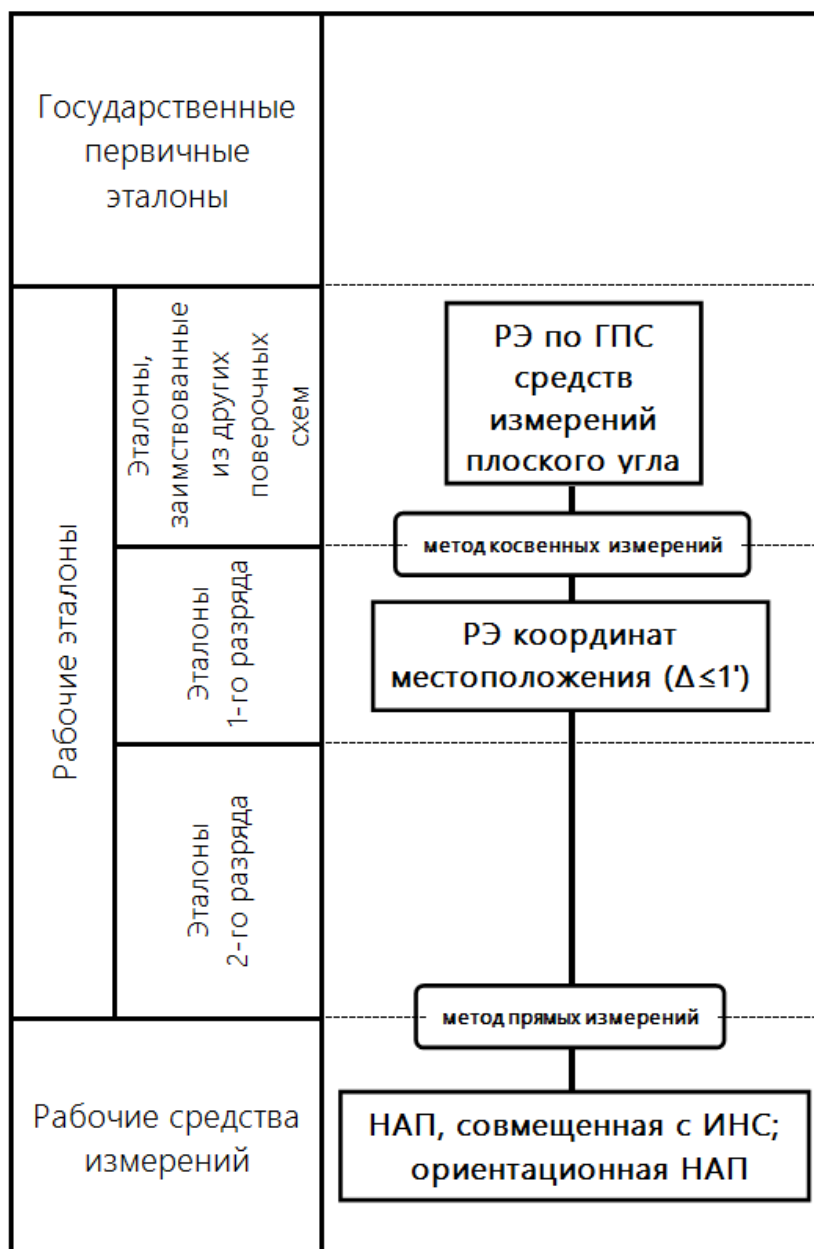


Рисунок 1.13 - Фрагмент ГПС для координатно-временных средств измерений (Приказ Росстандарта № 2831)

Конструктивно составная часть РЭ представляет собой высокоточный экземпляр УНАП, установленный с использованием специальной оснастки на колесном транспортном средстве. Передача единицы углов пространственной ориентации угломерной НАП осуществляется методом непосредственного сравнения. Для размещения УНАП на транспортном средстве необходимо провести её демонтаж с объекта эксплуатации. По результатам проведенного анализа для аттестации составной части РЭ, предназначенного для измерения углов пространственной ориентации, в ГПС заимствован РЭ единицы плоского угла. Для передачи единицы плоского угла от заимствованного РЭ необходима разработка метода косвенных измерений.

Для оценки точностных характеристик УНАП на этапе эксплуатации производители применяют углоизмерительные установки (опорно-поворотные устройства) (рисунки 1.14, 1.15) [28].



Рисунок 1.14 – Опорно-поворотное устройство
с датчиками углового положения



Рисунок 1.15 – Опорно-поворотное устройство с прецизионной механикой

Опорно-поворотные устройства обладают требуемой точностью воспроизведения углов поворота (единицы угловых секунд) и позволяют проводить оценку точностных характеристик УНАП в статике или при изменении углов пространственной ориентации во времени без поступательного движения. Недостатками рассмотренного метода являются необходимость демонтажа УНАП с объекта для размещения на стенде.

Для испытаний и периодического подтверждения точностных характеристик УНАП также применяются специальные транспортные средства, оснащенные бесплатформенной инерциальной навигационной системой и (или) УНАП [13, 14, 65]. Обзор статей конференции ION (The Institute of Navigation, США) [29] показал, что все методы оценки точности УНАП (ИНС/ГНСС) основаны на сравнении с данными от эталонных устройств при натурных испытаниях с неповторяемыми траекториями.

Для реализации этого метода контролируемая УНАП устанавливается на специальное транспортное средство, антенны устанавливаются на посадочные площадки и методом сравнения с «эталонным» образцом угломерной аппаратуры производится оценка характеристик.

Недостатком указанного метода в большинстве случаев является сопоставимая точность испытываемой УНАП и УНАП специального транспортного средства на любом интервале времени измерений [30] и невозможность проведения продолжительных по времени испытаний из-за увеличения систематической составляющей погрешности определения углов пространственной ориентации ИНС [31]. В случае использования интегрированной (инерциально - спутниковой) системы, необходимо подтверждение ее точностных характеристик с погрешностью, достаточной для дальнейшего применения при обеспечении единства измерений УНАП (для аттестации составной части РЭ координат местоположения первого разряда, необходим метод с расширенной неопределенностью $\leq 0,35'$ при коэффициенте охвата 2 без демонтажа составной части эталона с объекта установки).

Широко распространен также метод сравнения с равноточным средством с демонтажом антенной системы контролируемой УНАП [32]. Антенная система контролируемой УНАП демонтируется с объекта установки и на посадочные места устанавливается антенная система УНАП, используемой в качестве средства контроля. Проводится процедура начальной юстировки контрольной УНАП и проведение измерений. Далее, не перемещая объект установки, последовательно демонтируются антенны контрольной УНАП и монтируются антенны контролируемой УНАП. Затем после начальной юстировки и проведения измерений контролируемой УНАП, проводится статистическая обработка результатов измерений контролируемой УНАП, где в качестве действительных значений используются результаты измерений контрольной УНАП. Недостатком указанного метода является высокая трудоемкость, сопоставимая точность контролируемой и контрольной УНАП.

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 все рассмотренные методы оценки точностных характеристик УНАП не обеспечивают возможность проведения работ без снятия аппаратуры (антенных модулей аппаратуры) с объектов.

Для периодического определения погрешностей определения углов крена и тангажа возможно также применение уровнемерного прибора (рисунок 1.16). Уровнемерный прибор размещается на раме крепления антенн УНАП. В этом случае ужесточаются требования к геометрическим параметрам рамы крепления антенн на объекте (обеспечение соосности места установки уровнемера и мест крепления антенн, в том числе на этапе эксплуатации).

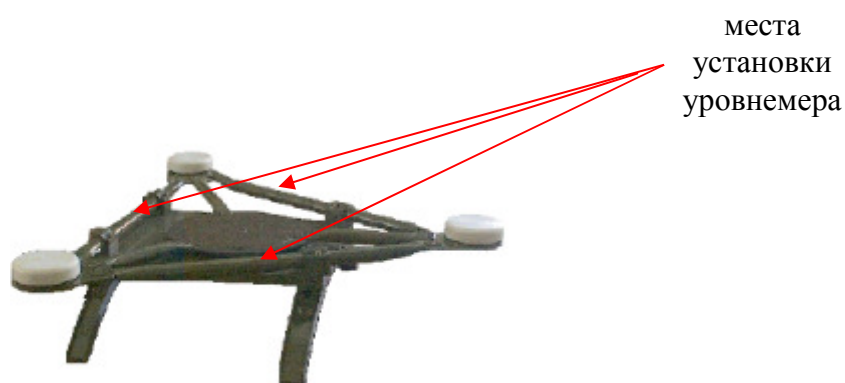


Рисунок 1.16 – Определение действительных значений углов крена и тангажа с использованием уровнемера

Существенным недостатком указанного метода является то, что он не может применяться для определения погрешности угла курса.

Таким образом, анализ известных методов и средств оценки точностных характеристик УНАП показал, что необходима разработка метода оценки точностных характеристик УНАП без снятия аппаратуры с объекта установки.

1.6 Анализ методов и средств начальной юстировки УНАП на объектах эксплуатации

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 с последующим учетом этих расхождений в программно-математическом обеспечении аппаратуры.

Данные о начальной юстировке УНАП могут быть представлены различным набором параметров (например, в виде значений «поворотов измерительных осей» УНАП, обеспечивающих однозначный пересчет значений углов пространственной ориентации, измеренных УНАП, в значения углов пространственной ориентации строительных осей объекта установки с учетом фактических значений углов крена и тангажа объекта).

В условиях переотражений сигналов НКА от деталей конструкции объекта, на котором установлена УНАП, или объектов окружающей её инфраструктуры, возможно появление погрешности измерения разности фаз несущего колебания сигнала НКА, обусловленного многолучевым распространением сигналов НКА (рисунок 1.17).

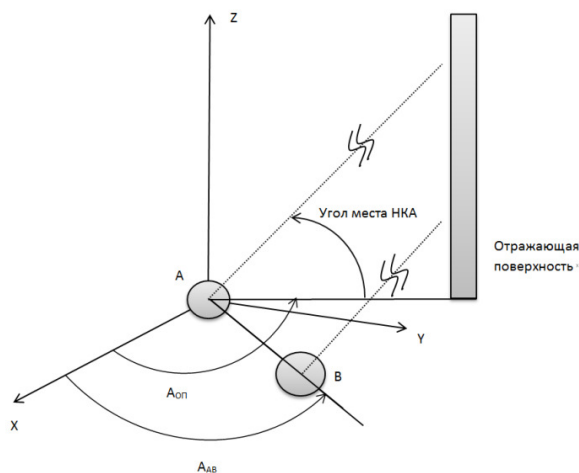


Рисунок 1.17 - Геометрические соотношения между прямым и отраженным сигналами для антенной системы, состоящей из двух элементов

Многолучевость ведет к появлению квазипериодической медленно меняющейся составляющей погрешности определения углов пространственной ориентации, влияющей на погрешность начальной установки УНАП (рисунок 1.18).

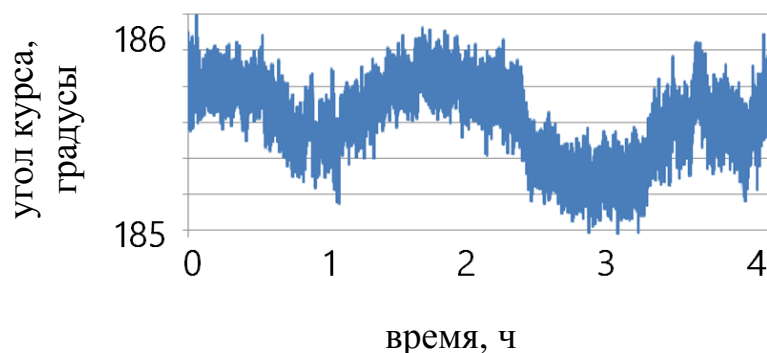


Рисунок 1.18 – Результаты измерений УНАП
угла курса в условиях многолучевости

Отсутствие алгоритмов корректного учета медленно меняющейся составляющей погрешности (при ее наличии) на этапе установки УНАП на объекте может привести к кратному увеличению итоговой погрешности начальной юстировки. Сложность учета медленно меняющейся составляющей погрешности заключается в том, что процесс является полигармоническим с априорно неизвестным периодом основной гармоник.

Систематическая погрешность начальной юстировки суммируется с погрешностью измерения углов пространственной ориентации с помощью УНАП после установки ее на объекте. Время начальной юстировки для наиболее прецизионных образцов УНАП, используемых в качестве средств испытаний может достигать 24 ч, что превышает по продолжительности интервал времени проведения работ с использованием этих образцов (одна рабочая смена).

Методики начальной установки УНАП, представленные в эксплуатационной документации, практически не содержат технических подробностей обеспечения гарантированной погрешности начальной

установки УНАП на объектах потребителя. Далее приведены цитаты из нескольких таких методик [33, 34, 35, 36]:

1) «Необходимо произвести юстировку антенной системы – коррекцию взаимного расположения осей антенной системы и объекта, на котором она расположена. Штатным способом измерить ориентацию объекта, на котором расположена антенная система аппаратуры. Произвести усреднение измеренных углов курса, тангажа и крена в течение 5 ч (18000 циклов)».

2) «Ввод юстировочных поправок производится в случаях, когда точно известны величины истинных курса, дифферента и крена объекта. Измеренные значения углов определяются УНАП в автоматическом режиме...».

3) «Антенны ориентировать вдоль продольной оси объекта...».

4) «...усреднение показаний УНАП для обеспечения требуемой погрешности юстировочных значений должно производиться на длительном интервале времени, например, (5...10) часов. Данное требование делает невозможным использование данного способа юстировки в тех случаях, когда требуется оперативная юстировка угломерной антенной системы на объекте».

5) «необходимо установить объект в известное угловое положение (либо с высокой точностью измерить фактическую ориентацию объекта каким-либо стандартным способом). Погрешность информации об ориентации объекта должна быть, как минимум, в 3 раза меньше, чем требуемая погрешность юстировки».

или рекомендации о начальной выставке в документации отсутствуют.

Применение таких методик начальной юстировки не может гарантированно обеспечить значение погрешности начальной установки УНАП на уровне менее величины нормированной погрешности определения углов пространственной ориентации.

Применяется на практике метод начальной установки УНАП с использованием лазерного указателя (ЛУ) [37]. При этом обеспечивается

высокоточная установка луча ЛУ в известное угловое положение. В процессе юстировки определяют поправки к значениям азимута – γ_a , тангажа – γ_t (при необходимости и крена γ_k), измеряемым аппаратурой для осей антенной системы. Поправки обеспечивают пересчет измеренных значений ориентации осей антенной системы в значения ориентации оси (осей) ЛУ. Юстировка антенной системы на объекте с использованием ЛУ выполняется следующим образом. Антенная система, для которой предварительно выполнена юстировка относительно оси ЛУ, монтируют на объекте, после чего определяют значения рассогласования осей ЛУ и объекта.

Рассогласование осей ЛУ и объекта определяют путем измерения расстояния между расположенными на этих осях точками на светорассеивающем экране, как это показано на **Ошибка! Источник ссылки не найден.**унке 1.19. В качестве экрана может использоваться стандартный выверочный щит, применяемый для обеспечения единства измерений на объекте.

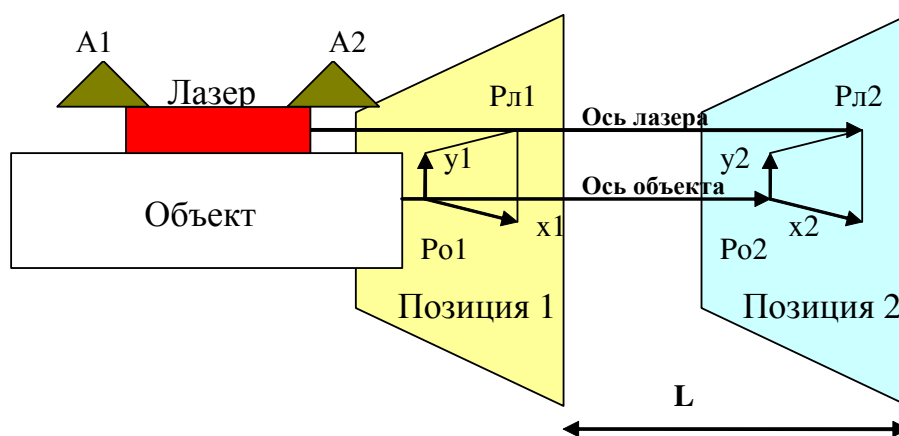


Рисунок 1.19 – Начальная выставка УНАП с использованием лазерного указателя

Экран устанавливают таким образом, чтобы его плоскость была перпендикулярна продольной оси объекта с погрешностью не более 5° . Экран монтируют на штативе при помощи штанги. Устанавливают штатив в

вертикальное положение по встроенному уровню, после чего необходимое положение экрана в вертикальной плоскости с требуемой точностью обеспечивается его конструкцией. В горизонтальной плоскости экран ориентируют при помощи расположенного на штанге визирного устройства, направляя его на точку, расположенную на продольной оси объекта.

Рассогласование осей ЛУ и объекта определяется следующим образом. После монтирования антенной системы на объекте устанавливают экран в позиции 1 (по возможности ближе к объекту), соблюдая указанные выше требования. На поверхности экрана определяют точки P_{o1} и $P_{л1}$, расположенные соответственно на осях объекта и ЛУ. Измеряют расстояния x_1 и y_1 , причем оси X и Y должны иметь отклонение от горизонтального и вертикального направлений не более 3° . Затем экран устанавливают в позиции 2, расположенной на расстоянии L от позиции 1. На поверхности экрана определяют точки P_{o2} и $P_{л2}$, расположенные соответственно на осях объекта и ЛУ. Измеряют расстояния x_2 и y_2 , причем оси X и Y должны иметь отклонение от горизонтального и вертикального направлений не более 3° .

Юстировочные поправки по курсу β_K и тангажу β_T рассчитываются по формулам:

$$\beta_K = \arctg \left(\frac{x_2 - x_1}{L} \right),$$

$$\beta_T = \arctg \left(\frac{y_2 - y_1}{L} \right)$$

В данной методике не конкретизировано за счет чего могут быть обеспечены в полевых условиях требуемые точности в процессе параллельного переноса щита в пространстве, а также при совмещении осей лазера относительно строительной оси объекта и относительно осей антенной системы УНАП.

1.7 Выводы

1. Установлено, что для аттестации составной части РЭ координат местоположения 1 разряда необходим метод передачи единицы плоского угла с расширенной неопределенностью $U \leq 0,35'$ при коэффициенте охвата 2.

2. Для определения инструментальной погрешности УНАП необходимо уточнить модель погрешности формирования разности фаз несущих частот навигационных сигналов на радиочастотных выходах имитатора сигналов ГНСС. Уточнение модели обеспечит как возможность расчета доверительных границ суммарной погрешности формирования разности фаз, так и позволит определить возможность использования каждого образца имитатора сигналов ГНСС в качестве РЭ.

3. Установлено, что для обеспечения погрешности формирования разности фаз не более $5,3^\circ$ (при доверительной вероятности 0,95) необходимо разработать метод определения калибровочных поправок к воспроизводимым имитатором сигналов ГНСС разностям фаз несущих частот сигналов навигационных космических аппаратов.

4. Для проведения работ по оценке точностных характеристик УНАП в местах её штатного размещения без прерывания работы, необходим метод передачи единицы плоского угла без демонтажа аппаратуры в полевых условиях с погрешностью $(4...12)'$ (при доверительной вероятности 0,95).

5. Необходима разработка метода оперативной начальной юстировки УНАП на объектах потребителей, обладающего требуемой точностью.

2. Уточнение модели погрешности формирования разности фаз несущих частот навигационных сигналов имитатором сигналов ГНСС

2.1 Основные принципы работы имитаторов сигналов ГНСС с несколькими РЧ-выходами

Имитаторы сигналов ГНСС обеспечивают формирование навигационного поля как совокупности навигационных сигналов ГЛОНАСС и/или других ГНСС. Формирование навигационных сигналов обеспечивается в соответствии со сценариями имитации, разработанными пользователем с применением специального программного обеспечения. Основным преимуществом использования имитаторов сигналов ГНСС является возможность многократного повторения траектории объекта размещения НАП с полным контролем параметров сигналов НКА и условий их распространения.

Имитаторы сигналов с одним РЧ-выходом формируют сигналы спутниковых группировок только для одного антенного входа НАП. По этой причине имитаторы с одним РЧ-выходом принципиально не могут быть использованы для обеспечения единства измерений УНАП в части углов пространственной ориентации.

Имитаторы сигналов с несколькими РЧ-выходами имеют больше функциональных возможностей для воспроизведения сигналов ГНСС. Несколько РЧ-выходов в имитаторе позволяют одновременно моделировать сигналы ГНСС для нескольких точек пространства: например, для траектории нескольких (по количеству РЧ-выходов) объектов-носителей НАП или формировать и воспроизводить сценарий имитации для НАП с несколькими антеннами, разнесенными в пространстве (например, УНАП).

На рисунке 2.1 показан фрагмент схемы электрической имитатора сигналов АИНС-М производства АО «КБ НАВИС».

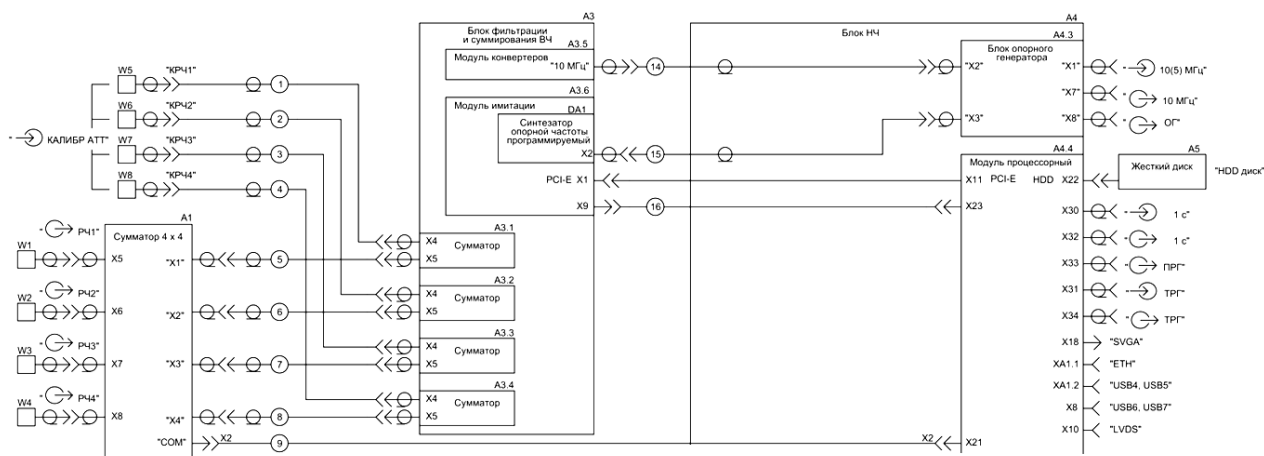


Рисунок 2.1 – Схема электрическая имитатора сигналов АИНС-М

Каждый сформированный навигационный сигнал через модуль фильтрации и суммирования подается на РЧ-выходы имитатора сигналов (при необходимости сигнал дополнительно ослабляется выходными аттенюаторами). Как видно на рисунке 2.1, в радиочастотном тракте имитатора сигналов ГНСС присутствуют частотно-зависимые элементы (например, фильтры на выходе ЦАП, выделяющие требуемую сигнальную полосу и подавляющие дополнительные спектры, обусловленные дискретизацией), которые оказывают влияние на задержку по фазе несущей частоты формируемых широкополосных навигационных сигналов.

2.2 Схемотехнические особенности формирования фазы несущей частоты навигационного сигнала имитатором сигналов ГНСС

Для ориентации объекта в пространстве с использованием сигналов ГНСС измеряемыми радионавигационными параметрами в УНАП являются разности временных задержек по фазе несущей частоты радионавигационного сигнала НКА (разности фаз) на входах разнесенных в пространстве антенных устройств.

Имитаторы сигналов ГНСС рассчитывают дальность от НКА до антенного входа потребителя по известным математическим моделям и формируют их как задержку навигационного радиосигнала относительно своей опорной шкалы времени.

Задержку навигационного сигнала, формируемого имитатором сигналов ГНСС по фазе несущей частоты, можно описать выражением [38]:

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

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 ГНСС, с;

$\rho_i^{\text{Ion}}, \rho_i^{\text{Trop}}, \rho_i^{\text{МЛР}}, \rho_i^{\text{РГЭ}}$ – формируемые задержки в ионосфере, тропосфере, за счет многолучевости, 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 радиочастотных 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 (формула 2.1):

$$\rho_{1i} - \rho_{2i} = 360^\circ \cdot f_i \cdot (\Delta\rho_i^{\text{ИМ}1} - \Delta\rho_i^{\text{ИМ}2}) \quad (2.1)$$

РЧ-тракты имитатора – это частотно-зависимые элементы (цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), фильтры, усилители, аттенюаторы и др.). Поэтому групповое время запаздывания воспроизводимых сигналов одного НКА в разных трактах (каналах) имитатора различно и отличается от теоретически рассчитанного формируемого значения беззапросной дальности [64]. В связи с этим, важной для испытаний УНАП погрешностью имитатора сигналов ГНСС является погрешность воспроизведения разности

фаз несущей частоты радионавигационного сигнала с разных радиочастотных выходов этого имитатора. Погрешность имеет систематическую и случайную составляющие.

Для оценки случайной составляющей погрешности воспроизведения разности фаз несущей частоты радионавигационного сигнала имитатором сигналов ГНСС может быть использовано выражение (1.1).

Рассмотрим составляющие систематической погрешности формирования задержки. Кроме учета задержек воспроизводимых имитатором сигналов в частотно-зависимых элементах радиотрактов, необходимо учитывать, что формирование фазы несущей частоты сигналов НКА в имитаторе осуществляется в цифровых схемах с дискретом ($\Delta\psi$). Значение дискрета обусловлено разрядностью кода (N), содержащего информацию о значении доплеровского смещения частоты формируемого навигационного сигнала. Код поступает на синтезатор промежуточной частоты имитатора сигналов ГНСС, как показано на рисунке 2.2 [26].

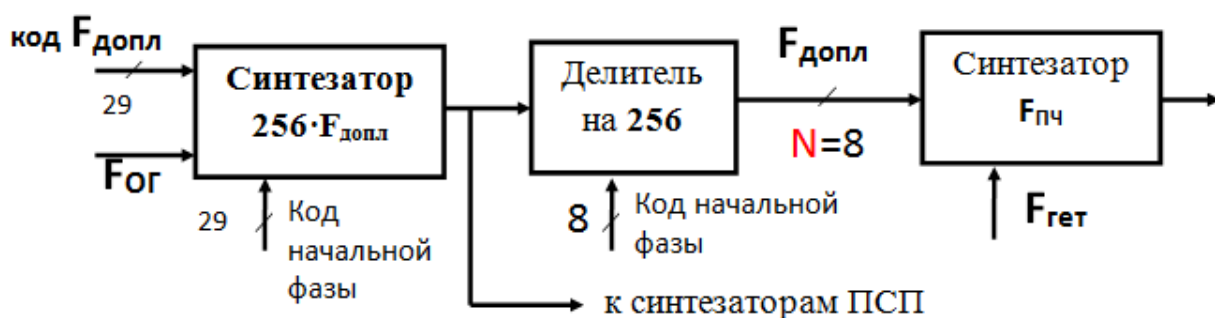


Рисунок 2.2 – Схема формирования сигнала промежуточной частоты в имитаторе сигналов ГНСС

Младший разряд кода уточняет значение фазы промежуточной частоты формируемого навигационного сигнала с дискретом изменения $360^\circ/2^N$. Гетеродинирование сигнала промежуточной частоты на несущую частоту сигнала ГНСС сохраняет дискрет перестройки фазы сигнала.

Для исследуемых в работе типов имитаторов сигналов ГНСС значение дискрета было определено автором экспериментально.

2.3 Экспериментальное исследование по определению дискрета формирования фазы несущей частоты сигнала НКА имитатором сигналов ГНСС

Для определения дискрета формирования фазы несущей частоты на имитаторе сигналов ГНСС был сформирован технологический сценарий. При исполнении этого сценария несущая частоты одного НКА не модулированная псевдослучайной последовательностью и с нулевым доплеровским смещением частоты воспроизводилась с двух РЧ-выходов имитатора сигналов ГНСС.

Схема проведения эксперимента представлена на рисунке 2.3.

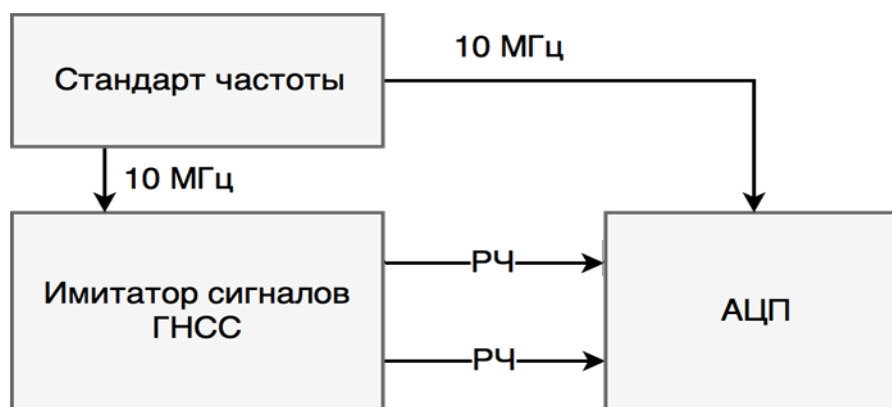


Рисунок 2.3 – Схема проведения измерений при определении дискрета формирования фазы несущей частоты в имитаторе

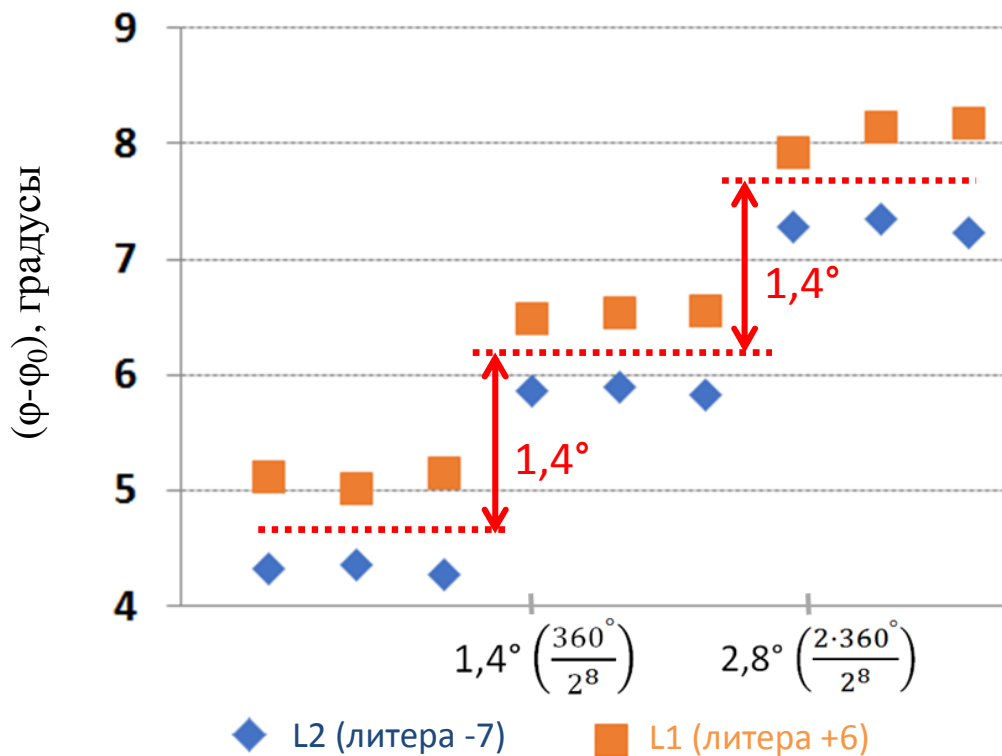
Сигнал одного НКА с двух РЧ-выходов имитатора подавался на два входа осциллографа LabMaster 10-50Zi-A-R. С помощью осциллографа эти гармонические сигналы с разных входов записывались в дискретном виде. После дополнительного усреднения выборки сигналов по 4000 отсчетов, значение их разности фаз вычислялось по формуле (2.2) [63]:

$$(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}} = \arcsin\left(2 \cdot \frac{\overline{S_1 \cdot S_2}}{A_1 \cdot A_2}\right) \quad (2.2)$$

где $\overline{S_1[k] \cdot S_2[k]}$ - среднее значение поэлементного усреднения массивов $S_1[k]$ и $S_2[k]$ выборок сигналов;

A_1, A_2 – амплитуды сигналов S_1 и S_2 , В.

В программно-математическом обеспечении имитатора сигналов ГНСС последовательно задавались значения приращений фазы для одного РЧ-выхода имитатора сигналов ГНСС кратные $0,35^\circ$. Начальное значение разности фаз обусловлено неидентичностью трактов имитатора сигналов ГНСС. Измеренные значения разности фаз, воспроизведенные имитатором сигналов, представлены на рисунке 2.4.



($\varphi - \varphi_0$), устанавливаемые для воспроизведения в интерфейсом ПО имитатора сигналов ГНСС, градусы

Рисунок 2.4 – Измеренные значения разности фаз при определении дискрета формирования фазы несущей частоты

Таким образом, по результатам нескольких экспериментов для исследованных типов имитатора сигналов ГНСС (АИНС-М, К2-99, К2-100, все производство АО «КБ НАВИС»), было определено значение дискрета перестройки фазы несущей частоты сигналов НКА, которое составило $1,4^\circ$ (для $N=8$).

Полученное значение дискрета перестройки для указанных типов имитаторов оказалось сопоставимо по величине с случайной составляющей погрешности формирования задержки навигационного сигнала по фазе несущей частоты ($s_p = 1,3^\circ$).

2.4 Уточнение модели погрешности формирования разности фаз имитаторами сигналов ГНСС

В соответствии с ГОСТ 8.381-2009 «ГСИ. Эталоны. Способы выражения точности» [39] для вторичных эталонов единиц величин указывают доверительные границы суммарной погрешности, вычисленные с вероятностью, равной 0,95. Суммарная погрешность образована случайной погрешностью и НСП самого вторичного эталона, случайной погрешностью и НСП вышестоящего эталона и погрешностью передачи единицы величины от вышестоящего эталона вторичному.

В соответствии с [39] доверительные границы суммарной погрешности воспроизводимой разности фаз вычисляются по формуле:

$$\Delta_{(\varphi-\varphi_0)_{(p=0,95)}} = \pm K_{\Sigma} \cdot S_{\Sigma},$$

где K_{Σ} – коэффициент, определяемый доверительной вероятностью 0,95 и отношением случайных погрешностей и неисключенной систематической погрешности (НСП);

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{(\varphi-\varphi_0)}^2 + S_{\Theta(\varphi-\varphi_0)}^2} - \text{суммарное СКО воспроизведения}$$

разности фаз, градус.

СКО формирования разности фаз вычисляется по формуле:

$$S_{(\varphi-\varphi_0)} = \sqrt{2 \cdot S_p^2 + S_1^2},$$

где S_1 - СКО измерения разности фаз эталоном при передаче единицы разности фаз имитатору сигналов ГНСС, градус.

СКО НСП вычисляется по формуле (для числа составляющих НСП не более 3 и равномерном распределении возможных значений):

$$S_{\Theta(\varphi-\varphi_0)} = \sqrt{\frac{\left(|(\varphi - \varphi_0)_1| + 360^\circ/2^N + |\Theta_1| \right)^2}{3}}$$

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

Θ_1 – НСП вышестоящего эталона, используемого для передачи единицы разности фаз имитатору сигналов ГНСС, градус.

Итоговое выражение для доверительных границ суммарной погрешности формирования разности фаз имитатором сигналов ГНСС получено в следующем виде (формула 2.3):

$$\Delta_{(\varphi-\varphi_0)_{(p=0,95)}} = \pm K_\Sigma \cdot \sqrt{\frac{\left(|(\varphi - \varphi_0)_1| + 360^\circ/2^N + |\Theta_1| \right)^2}{3} + 2S_p^2 + S_1^2} \quad (2.3)$$

В формуле (2.3)

$$K_\Sigma = \frac{t_{0,95}(v>200) \cdot S_{(\varphi-\varphi_0)} + \left| (\varphi - \varphi_0)_1 \right| + 360^\circ/2^N + |\Theta_1|}{S_{(\varphi-\varphi_0)} + S_{\Theta(\varphi-\varphi_0)}}$$

где $t_{0,95}(v>200) = 1,96$ – коэффициент Стьюдента.

2.5 Анализ уточненной модели погрешности формирования разности фаз имитаторами сигналов ГНСС

Проведем анализ составляющих суммарной погрешности формирования разности фаз имитаторами сигналов ГНСС.

Для исследуемых в работе типов имитаторов сигналов ГНСС $S_{(\varphi-\varphi_0)} = 1,3^\circ$ [26], $N=8$. Составляющая НСП $(\varphi - \varphi_0)_1$, обусловленная неидентичностью каналов имитатора сигналов ГНСС, возможно уменьшить в результате калибровки. На рисунке 2.5 представлена зависимость суммарной погрешности формирования разности фаз от НСП вышестоящего эталона (далее будем считать, что калибровка имитатора сигналов ГНСС проводится на вышестоящем эталоне). СКО вышестоящего эталона в расчетах принято $0,15^\circ$ (значение получено экспериментально в главе 3). Из графика видно, что требуемая погрешность формирования разности фаз $5,3^\circ$ обеспечивается при использовании метода калибровки с расширенной неопределенностью (при коэффициенте охвата 3) не более 1° . Погрешность формирования разности фаз $1,8^\circ$ для имеющихся типов имитаторов сигналов ГНСС в настоящее время не достижима.

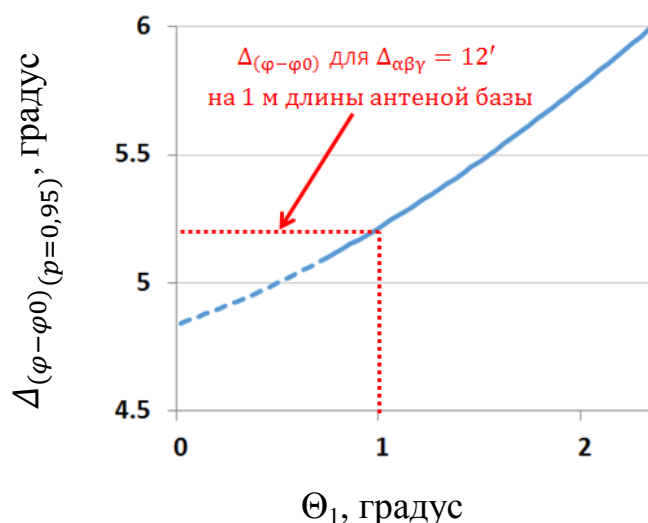


Рисунок 2.5 – Анализ требований к методу калибровки для используемых типов имитаторов сигналов ГНСС

Расчеты показывают (рисунок 2.6), что для достижения суммарной погрешности формирования разности фаз $1,8^\circ$ в перспективном имитаторе сигналов ГНСС необходимо обеспечить следующие характеристики:

- СКО формирования задержки по фазе несущей частоты $S_p \leq 0,3$ мм (что эквивалентно $0,6^\circ$ фазы несущей частоты навигационного сигнала);
- разрядность кода ЦАП, управляющего формированием фазой несущей частоты, не менее 11.

Кроме того, для обеспечения единства измерений таких имитаторов сигналов ГНСС необходимо применение метода калибровки с расширенной неопределенностью ($k=3$) не более $0,5^\circ$.

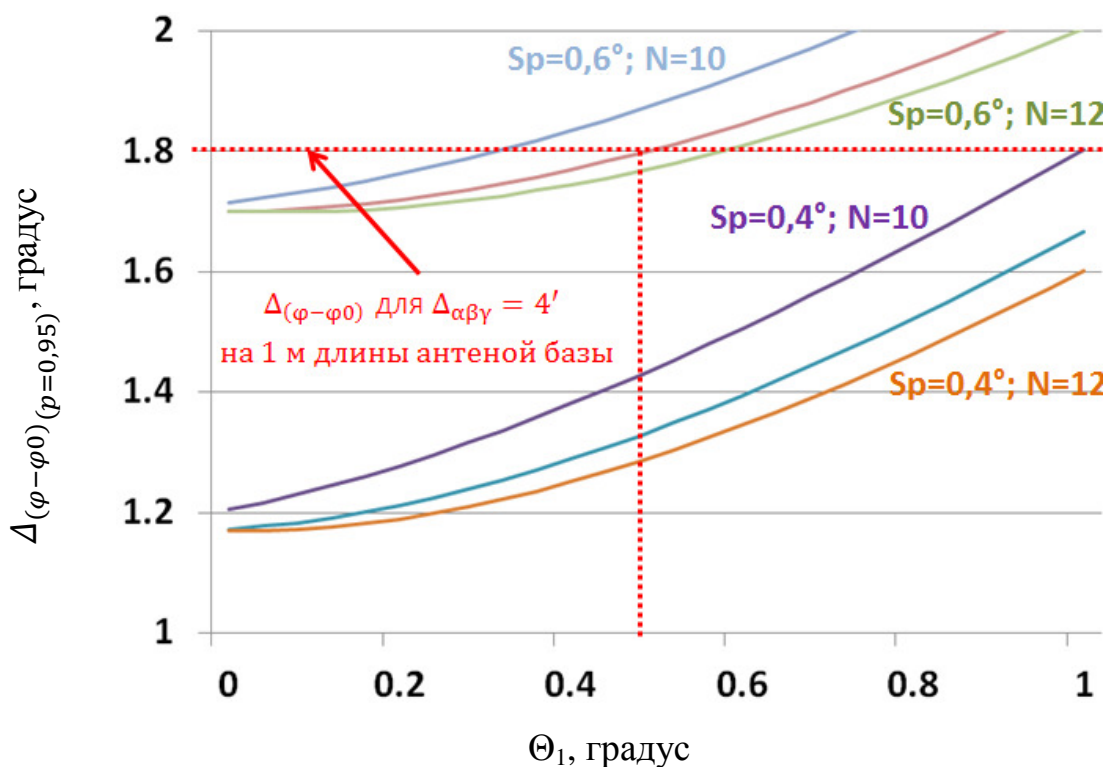


Рисунок 2.6 – Анализ требований к методу калибровки для перспективных типов имитаторов сигналов ГНСС

В соответствии с ГОСТ 8.381-2009, составляющие НСП должны быть представлены границами погрешности. Следовательно, метод калибровки имитатора сигналов ГНСС в части систематической погрешности

формирования разности фаз должен иметь расширенную неопределенность 1° при коэффициенте охвата 3.

2.6 Выводы

1. Уточнена модель погрешности формирования разности фаз несущей частоты сигнала НКА имитатором сигналов ГНСС, учитывающая схемотехнические особенности формирования радионавигационных сигналов (дискретность перестройки фазы несущей частоты сигналов, неидентичность частотно-зависимых элементов радиотрактов) на частоте несущей.

2. Для обеспечения требуемого значения погрешности формирования разности фаз существующими типами имитаторов сигналов ГНСС (не более $5,3^\circ$) необходима разработка метода определения калибровочных поправок к воспроизводимым имитатором разностям фаз несущих частот сигналов ГНСС с расширенной неопределенностью ($k=3$) не более 1° .

3. Для уменьшения погрешности формирования разности фаз сигналов ГНСС в имитаторе (не более $1,8^\circ$), в перспективных разработках имитаторов необходимо обеспечить следующие характеристики:

- СКО формирования задержки по фазе несущей частоты $S_p \leq 0,3$ мм ($\leq 0,6^\circ$);
- разрядность кода ЦАП, управляющего формированием фазой несущей частоты, не менее 11;

Кроме того, для обеспечения единства измерений таких имитаторов сигналов ГНСС необходимо применение метода калибровки с расширенной неопределенностью ($k=3$) не более $0,5^\circ$.

3. Метод определения калибровочных поправок к воспроизводимым имитатором разностям фаз несущих частот сигналов ГНСС

Для определения и учета систематической погрешности формирования разности фаз имитаторами сигналов ГНСС, рассмотрим существующие методы измерения разности фаз между навигационными сигналами ГНСС

3.1 Анализ методов и средств измерения угла фазового сдвига между двумя электрическими сигналами в L диапазоне частот

3.1.1 Методы в соответствии с Государственной поверочной схемой для средств измерений угла фазового сдвига

ГОСТ Р 8.875-2014 содержит описание методов и средств передачи единицы угла фазового сдвига между двумя электрическими сигналами имитаторам сигналов ГНСС и спутниковым навигационным фазовым приемникам [40].

В соответствии с ГОСТ, имитатор сигналов ГНСС входит в состав ГЭТ 207-2013 и используется для передачи единицы величины спутниковым фазовым приемникам. Метод основан на использовании работающего на частоте 10 МГц устройства воспроизведения угла фазового сдвига между двумя электрическими напряжениями и линии переменной длины, работающей в диапазоне частот от 10 МГц до 2 ГГц.

К выходу имитатора сигналов ГНСС через линию переменной длины подключается спутниковая геодезическая аппаратура, работающая по фазе несущей частоты НКА. Устройство воспроизведения угла фазового сдвига используется как источник опорной частоты 10 МГц для имитатора сигналов ГНСС и спутниковой геодезической аппаратуры.

На имитаторе сигналов ГНСС моделируется технологический сценарий формирования сигнала одного неподвижного НКА. На линии переменной длины (или в устройстве воспроизведения угла фазового сдвига) изменяется задержка, что приводит к изменению задержки сигнала НКА, принимаемого

приемником. Разность между показаниями приемника и линии задержки (устройства воспроизведения) есть погрешность приемника.

Как следует из описания метода передачи единицы величины, метод предназначен для определения погрешности измерения относительного приращения фазы несущей частоты сигнала НКА и не предназначен для определения погрешности измерения разности фаз несущих частот с разных радиочастотных выходов имитатора сигналов ГНСС.

3.1.2 Метод с применением двух комплектов спутниковой геодезической аппаратуры, работающих по фазе несущей частоты

Метод используется при проверке работоспособности сценариев имитации для УНАП или для оценки сходимости результатов между несколькими экземплярами (типами) имитаторов при исследовании их точностных характеристик.

На первом этапе проводится относительная калибровка по фазе несущей частоты двух приемников, работающих от внешней частоты и общей внешней шкалы времени по схеме, указанной на рисунке 3.1.

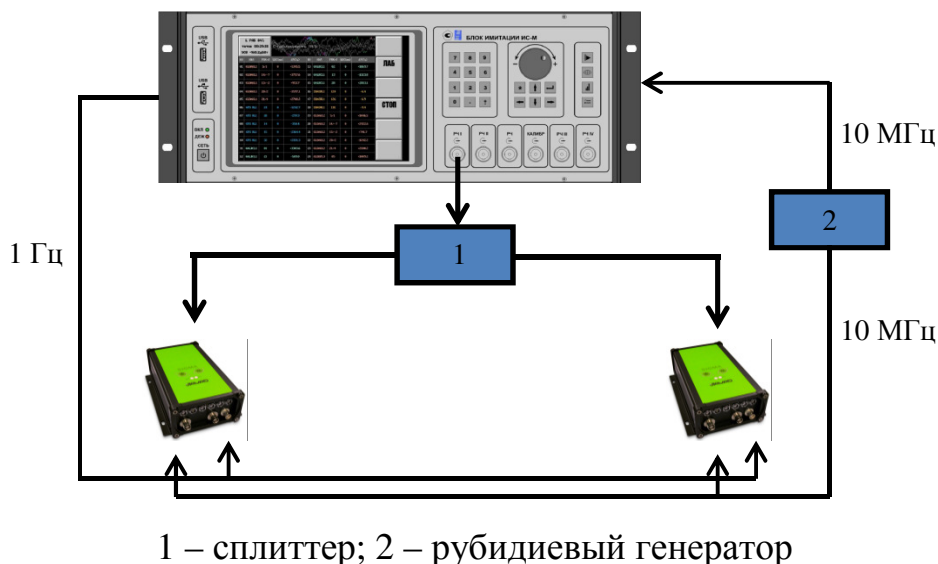


Рисунок 3.1 – Схема относительной калибровки аппаратуры

Систематическая разница измерения фазовой дальности до НКА между двумя комплектами приемников ΔPD^j определяется по формуле:

$$\Delta PD^j = \sum_{i=1}^T \frac{PD_{i1}^j - PD_{i2}^j}{T}$$

где PD_{i1} и PD_{i2} – фазовая беззапросная дальность, измеренная первым и вторым комплектами приемника соответственно;

j – номер НКА;

i – номер измерения;

T – количество измерений.

Результаты измерений систематической разницы между комплектами по одному общему НКА представлены на рисунке 3.2.

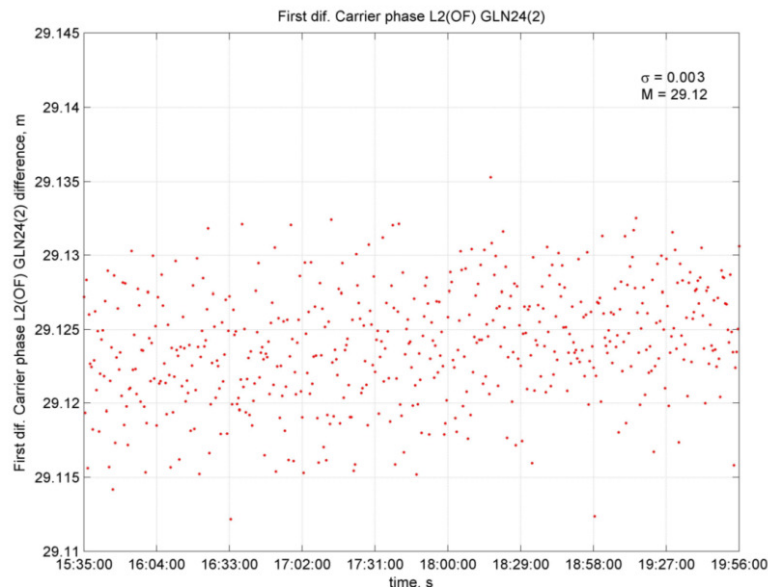
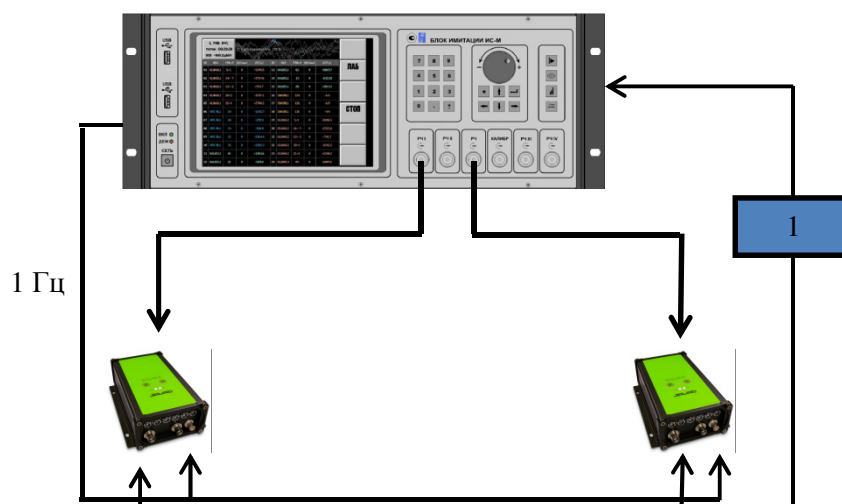


Рисунок 3.2 – Результаты относительной калибровки двух приемников
(среднее значение 29,12 м)

Разности измеренных задержек сигналов по фазе несущей частоты учитываются при расчете разностей фаз, измеренных на втором этапе (схема измерений представлена на рисунке 3.3).



1 – рубидиевый генератор

Рисунок 3.3 – Схема измерений разности фаз несущей частоты сигнала НКА, воспроизводимой имитатором с разных радиочастотных выходов

Относительные измерения увеличивают случайную составляющую погрешности (минимум в $\sqrt{2}$ раз). Важно отметить, что в схеме на рисунке 3.3 используются дополнительные соединительные кабели и не используется сплиттер, что изменяет ранее откалиброванную разность хода сигнала НКА от имитатора сигналов ГНСС до РЧ-входов приемников и увеличивает методическую погрешность. Эксперименты показывают, что эти отличия могут составлять несколько периодов длин волн.

3.1.3 Метод с использованием осциллографов

Наиболее широкополосные осциллографы в настоящее время имеют частоту дискретизации 40 ГГц (значение дискрета 25 пс), или 12° в пересчете на градусы фазы несущей частоты L2 (литера минус 7). Погрешность измерения фазы в каждом канале осциллографа равна половине величины дискрета, следовательно, погрешность измерения разности фаз не может быть менее 12° .

Таким образом, необходима разработка метода измерения разности фаз несущих частот сигнала НКА, формируемого имитатором сигналов ГНСС, с расширенной неопределенностью ($k=3$) не более 1° .

3.2 Разработка метода измерения разности фаз несущей частоты навигационных сигналов, формируемых имитатором сигналов ГНСС

Как было показано ранее (формула 2.1), в случае формирования имитатором сигнала одного общего НКА на двух РЧ- выходах с нулевой дальностью и нулевыми погрешностями трассы распространения, значение формируемой разности фаз будет равно разности инструментальных погрешностей формирования задержек по фазе несущей частоты.

3.2.1 Описание предлагаемого метода

Метод основан на использовании осциллографа в качестве аналого-цифрового преобразователя с последующей передачей массива данных - результатов оцифровки входного сигнала на внешнюю ПЭВМ для постобработки.

Схема измерений по данному методу остается прежней и показана на рисунке 2.3.

В соответствии со схемой измерений, модель измеряемой величины можно описать выражением (3.1):

$$(\varphi - \varphi_0) + (\varphi - \varphi_0)_1 = (\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}} + (\varphi_{\text{каб2}} - \varphi_{\text{каб1}}) \quad (3.1)$$

где $(\varphi - \varphi_0)$ – значение разности фаз, заданное для формирования в ПМО имитатора сигналов ГНСС (значение равно нулю), 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.

На имитаторе сигналов ГНСС создается технологический сценарий. Воспроизведение технологического сценария имитатором сигналов ГНСС обеспечивает формирование сигнала одного неподвижного НКА на РЧ-выходы имитатора сигналов ГНСС.

Для обеспечения требуемой точности метода амплитуда воспроизводимых имитатором сигналов НКА на РЧ-выходах должна быть не

менее 0,64 В. Это значение определяется метрологическими характеристиками используемого осциллографа. В данной работе был использован осциллограф цифровой запоминающего типа LabMaster 10-50Zi-A-R.

Обработка записанных осциллограмм в дискретной форме РЧ-сигналов проводилась в специальном программном обеспечении. Алгоритм обработки был реализован в среде программирования MatLab/Octave.

Записанные на осциллографе выборки навигационного сигнала с разных радиочастотных выходов имитатора сигналов ГНСС могут быть представлены следующими выражениями (3.2, 3.3):

$$S_1[k] = A_{I1} \cdot \cos(2\pi f_0 kT + \varphi_1) + A_{Q1} \cdot \sin(2\pi f_0 kT + \varphi_1) \quad (3.2)$$

$$S_2[k] = A_{I2} \cdot \cos(2\pi f_0 kT + \varphi_2) + A_{Q2} \cdot \sin(2\pi f_0 kT + \varphi_2), \quad (3.3)$$

где A_I и A_Q – синфазная и квадратурная составляющие амплитуды сигналов, В;

f_0 – частота несущей сигнала НКА, Гц;

T – период несущей частоты сигнала НКА, с;

φ_1 и φ_2 – начальные фазы записанных сигналов, рад\$

k – номер дискрета.

Далее в расчетах $A_{1,2} = \sqrt{A_{I1,2}^2 + A_{Q1,2}^2}$.

Пример записанной выборки с одного РЧ-канала длительностью 0,6 мкс представлен на рисунке 3.4 (по оси абсцисс – количество выборок (дискретов), $k = 1 \dots 120\,000$).

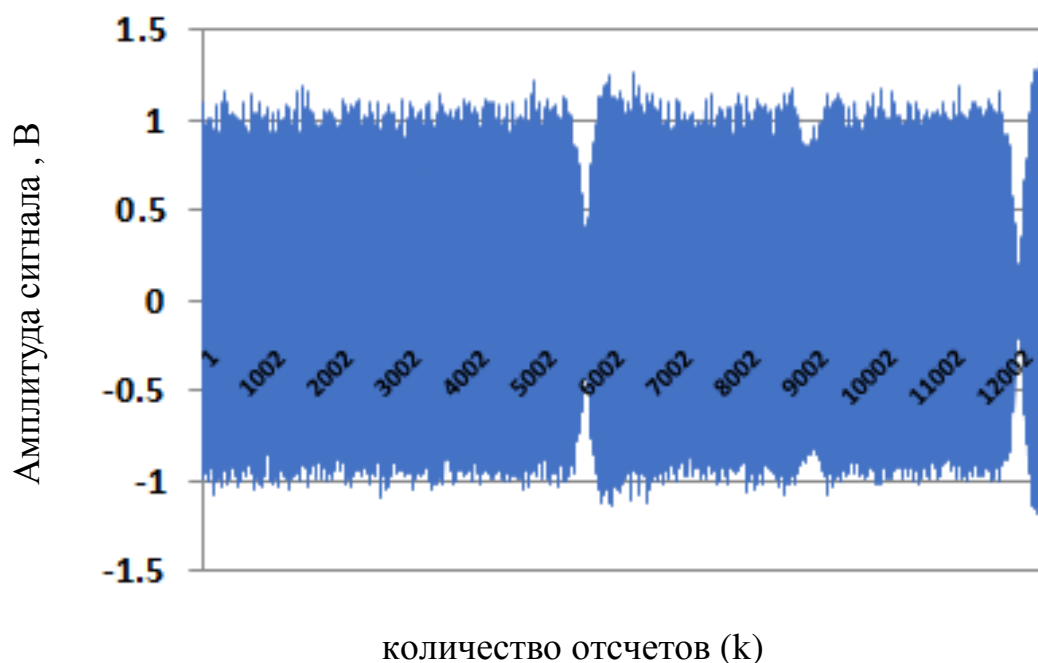


Рисунок 3.4 – Записанный сигнал (канал 1)

Далее, для вычисления разности фаз сигналов необходимо внутри выборки найти интервалы с линейным изменением фазы, т.е. не содержащие изменения фазы за счет модуляции записанных сигналов двоичными последовательностями дальномерного кода данного НКА. Для этого необходимо определить начальные фазы записанных сигналов и произвести разделение квадратур сигналов путем умножения каждой выборки на синфазный и квадратурный опорные гармонические сигналы [42]. Опорные сигналы также должны быть представлены в дискретной форме с частотой дискретизации, равной частоте дискретизации осциллографа.

Результат умножения сигнала с одного из двух радиочастотных выходов на синфазный и квадратурный опорные гармонические сигналы показан на рисунке 3.5.

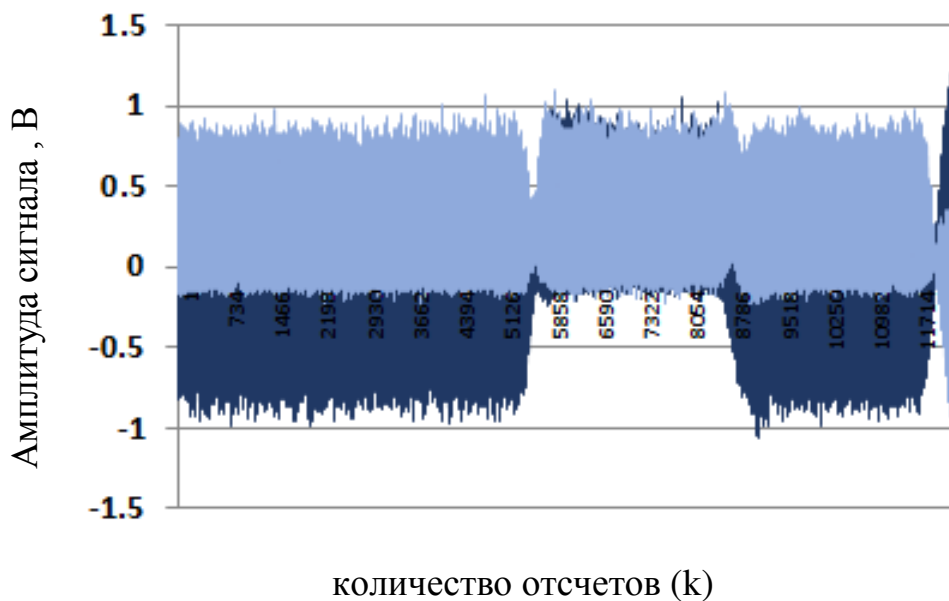


Рисунок 3.5 – Демодулированный сигнал с радиочастотного выхода

Далее производится усреднение «окном усреднения», длина которого должна быть много меньше длины чипа квадратурной составляющей сигнала. В представленном эксперименте окно усреднения было выбрано равным 10 дискретам осциллографа. В результате можно определить интервалы времени (ΔT_i), с линейным изменением фазы, как показано на рисунке 3.6.

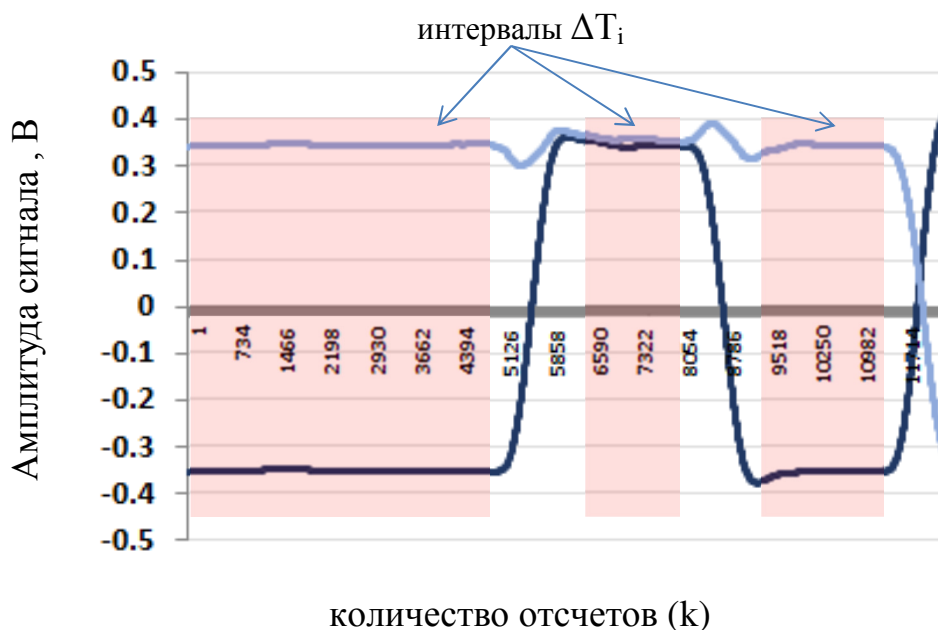


Рисунок 3.6 – Усредненный демодулированный сигнал

Отчеты выборки, используемые для расчета разности фаз несущих частот, выбираются по правилу $S[k] \in \Delta T_i$, если $S[k] \cdot S[k+1] > 0$. Если $S[k] \cdot S[k+1] < 0$, то $S[k-m] \dots S[k-1]$, $S[k]$, $S[k+1] \dots S[k+m]$ исключаются из интервала времени ΔT_i . (количество исключаемых отчетов (m) в общем случае зависит от длины фронта чипа псевдослучайной последовательности конкретного типа имитатора навигационных сигналов).

Далее для всех отчетов с выходов имитатора РЧ1 и РЧ2, попадающих в интервалы времени ΔT_i , вычисляется разность фаз сигналов по формуле (2.2). Так как значения разности фаз вычисляются на интервалах времени без фазовых манипуляций, математические операции по формуле (2.2) проводятся с дискретными сигналами, которые можно записать в упрощенном виде относительно выражений (3.2, 3.3):

$$S_1[k]' = A_1 \cdot \cos(2\pi f_0 kT + \varphi_1) \quad (3.4)$$

$$S_2[k]' = A_2 \cdot \cos(2\pi f_0 kT + \varphi_2), \quad (3.5)$$

Предложенный в данной работе метод расчета разности фаз по формуле (2.2) был выбран среди других методов вычисления разности фаз, адаптированных для применения в цифровых информационно-измерительных системах, по критерию обеспечения наименьшей погрешности на границах диапазона измерений [41].

Так как формула (2.2) 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 $\leq \frac{\lambda}{4}$. [42].

3.2.2 Бюджет неопределенности калибровки

Для реализации предложенного метода использовались следующие измерительные средства:

- государственный вторичный эталон 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) для измерения фазы коэффициентов передачи (соединительных кабелей), фазы коэффициента отражения (измерительной аппаратуры и соединительных кабелей);

- осциллограф LabMaster 10-50Zi-A-R;

- внешний высокостабильный стандарт частоты и времени (использовались сигналы государственного первичного эталона времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭС 1-2018) (разностью опорных частот имитатора и осциллографа можно пренебречь).

В соответствии с [43] и моделью измерений (3.1), расширенная неопределенность калибровки при коэффициенте охвата 3 определяется по формуле (3.6) [43]:

$$U = 3 \cdot \sqrt{8 \cdot u_1^2 + 2 \cdot u_2^2 + u_3^2 + (c \cdot u_4)^2 + u_A^2} \quad (3.6)$$

где u_1 – стандартная неопределенность измерения фазы коэффициента отражения разъемов аппаратуры и соединительных кабелей, градус;

u_2 – стандартная неопределенность измерения фазы коэффициента передачи соединительных кабелей, градус;

u_3 – стандартная неопределенность измерения из-за погрешности отсчета, градус;

u_4 – стандартная неопределенность, обусловленная погрешностью измерения амплитуды сигналов осциллографом, В;

c – коэффициент чувствительности, В⁻¹;

u_A – стандартная неопределенность по типу А (определена экспериментально), градус.

В соответствии с документацией на государственный вторичный эталон 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) [44]:

- расширенная неопределенность передачи единицы комплексного коэффициента отражения при коэффициенте охвата $k=2$ (для диапазона частот до 2 ГГц, соединитель III N) 0,17°;

- расширенная неопределенность передачи единицы угла фазового сдвига при коэффициенте охвата $k=2$ (для диапазона частот до 2 ГГц, меры ослабления от 0 до 3 дБ, соединитель III N) 0,15°.

При отработке предложенного метода частота дискретизации осциллографа выбрана 20 ГГц, что эквивалентно пределам погрешности измерения разности фаз 22,7° для единичного измерения (длина волны несущей частоты $\lambda = 0,24$ м, погрешность в каждом канале равна половине величины дискрета ($1/(2 \cdot 20 \text{ ГГц}) = 25 \text{ пс}$), $1^\circ = 2,2 \text{ пс}$).

В соответствии с описанием типа на осциллограф цифровой запоминающий LabMaster 10-50Zi-A-R [45], предел допускаемой абсолютной погрешности измерения напряжения для коэффициента отклонения $K_0 = 80 \text{ мВ/дел}$ (амплитуда сигналов не менее 0,64 В) равен $\theta_{\text{осц}} = 10 \text{ мВ}$.

Так как измерения амплитуд сигналов осциллографом с РЧ-выходов имитатора сигналов ГНСС и измерения разности фаз связаны функциональной зависимостью (2.1) (измерения косвенные), был проведен расчет коэффициента чувствительности (выражение 3.7):

$$c = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \left[\left(\frac{\sqrt{5}}{A_1} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{5}}{A_2} \right)^2 + \frac{8}{5 \cdot k \cdot A_1 \cdot A_2} \right]} \quad (3.7)$$

Вывод выражения (3.7) представлен в приложении Б.

Расчет значения расширенной неопределенности проведен при $A_1=A_2=1$ В.

Стандартная неопределенность по типу А была определена экспериментально (см. далее раздел 3.2.3), а её значение не превысило $0,15^\circ$.

Для сигналов системы ГЛОНАСС с частотным разделением, длина чипа синфазной компоненты 2000 нс, длина чипа квадратурной компоненты 200 нс. Следовательно, для повышения точности метода возможно осреднение выборок АЦП осциллографа на интервалах времени до 200 нс (минимальный интервал времени на котором фаза несущей частоты изменяется линейно).

Бюджет неопределенности калибровки имитаторов сигналов ГНСС в части систематической составляющей инструментальной погрешности формирования задержки по фазе несущей частоты навигационного сигнала приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Бюджет неопределенности калибровки имитаторов сигналов ГНСС

Источник неопределенности	Тип	Значение входной величины	Вероятностное распределение	Делитель	Коэф. чувствительности	Значение
Расширенная неопределенность измерения фазы коэффициента передачи соединительных кабелей	В	$0,15^\circ$	Нормальное	2	1	$0,08^\circ$
Расширенная неопределенность измерения фазы коэффициента отражения разъемов аппаратуры и соединительных кабелей	В	$0,17^\circ$	Нормальное	2	1	$0,09^\circ$

Источник неопределенности	Тип	Значение входной величины	Вероятностное распределение	Делитель	Коэф. чувствительности	Значение
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	$\sqrt{3 \cdot N}$	см. формулу (3.7)	0,01°
Случайная погрешность	A	0,15°	Нормальное	1	1	0,15°

На рисунке 3.7 приведены значения расширенной неопределенности метода, рассчитанные по формуле (3.6), в зависимости от величины дискрета и количества допустимых усреднений (усреднение должно быть проведено на интервале времени не более 200 нс).

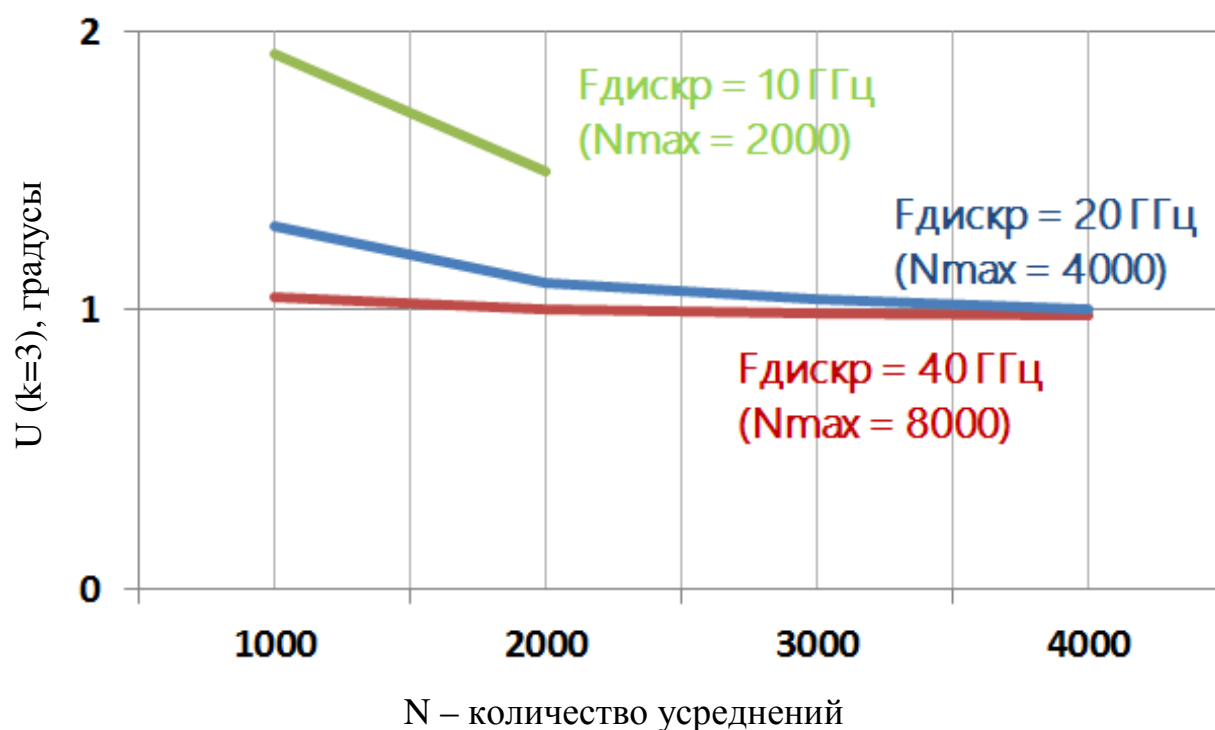


Рисунок 3.7 – Расширенная неопределенность разработанного метода

Как видно из представленных графиков на рисунке 3.7, значение расширенной неопределенности измерения разности фаз в 1° может быть получено при частоте дискретизации АЦП не менее 20 ГГц и при количестве усреднений выборки не менее 4000 точек.

3.2.3 Сравнение результатов измерений разности фаз Государственным вторичным эталоном и предложенным методом

Достигнутая точность предложенного метода была подтверждена экспериментально. С этой целью были проведены измерения разности фаз сигналов с использованием пассивного делителя сигналов последовательно:

- на первом этапе Государственным вторичным эталоном 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);
- на втором этапе АЦП с последующей обработкой результатов измерений осциллографа разработанным методом.

Получена сходимость результатов измерений разности фаз сигналов в $0,7^\circ$ для диапазона частот от 1 до 2 ГГц, как показано на рисунке 3.8.

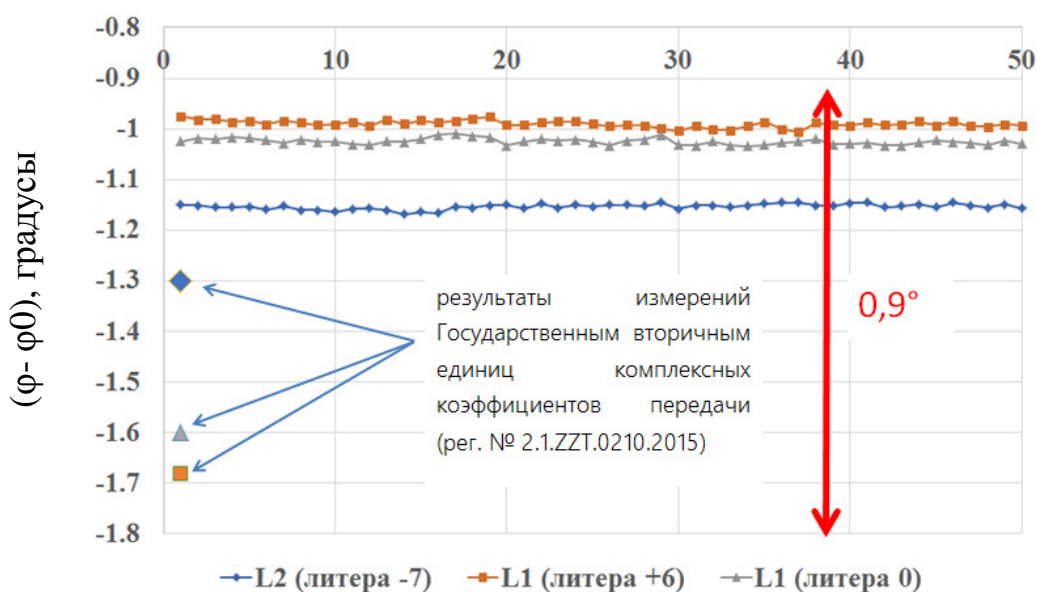


Рисунок 3.8 – Результаты измерений разности фаз разработанным методом и Государственным вторичным эталоном

Дополнительно в процессе проведения данного эксперимента для разработанного метода также была определена стандартная неопределенность по типу А значение которой не превысило $0,15^\circ$.

3.2.4 Опробование предложенного метода

Опробование предложенного метода было проведено следующим образом. Вначале с использованием осциллографа цифрового запоминающего LabMaster 10-50Zi-A-R были проведены измерения разности фаз несущих частот сигналов НКА, формируемых имитатором сигналов АИНС-М, по схеме, представленной на рисунке 2.3:

Проведены две серии измерений:

- одна серия для определения калибровочных поправок имитатора сигналов ГНСС (результаты измерений представлены на рисунке 3.9);
- вторая серия после учета калибровочных поправок (результаты измерений представлены на рисунке 3.10).

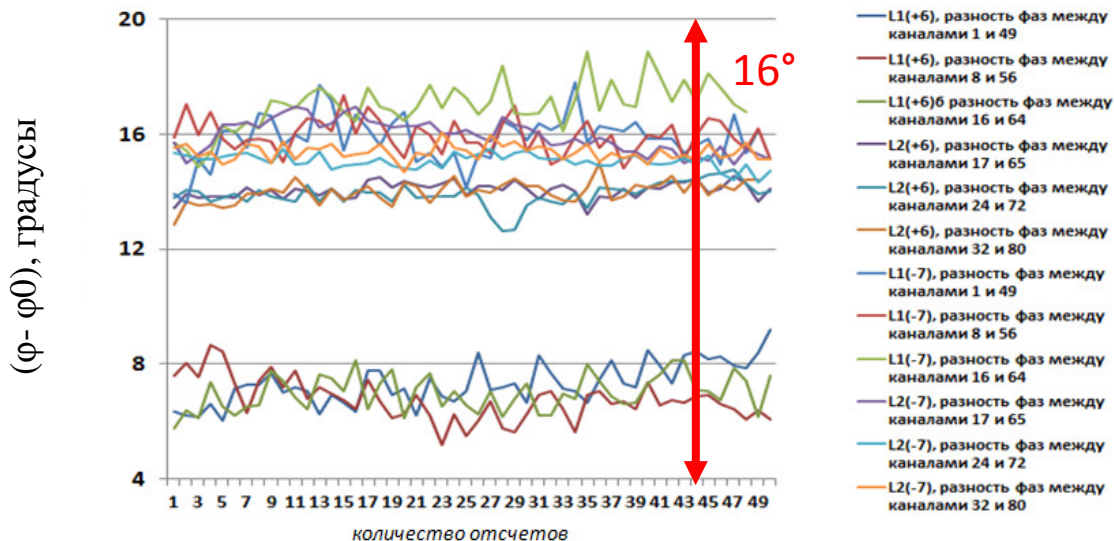


Рисунок 3.9 – Результаты измерения разности фаз, формируемых имитатором сигналов ГНСС до применения калибровочных поправок

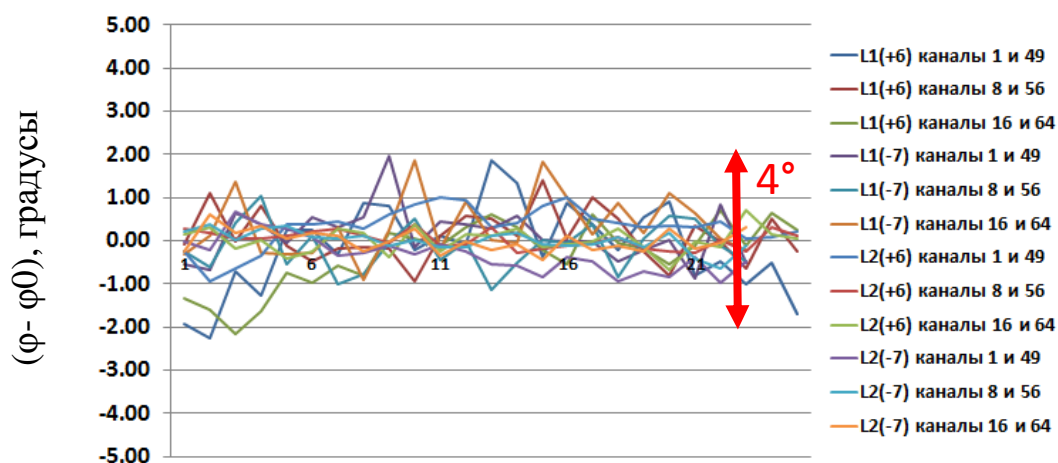


Рисунок 3.10 – Результаты измерения разности фаз, формируемых имитатором сигналов ГНСС после применения калибровочных поправок

Проведенный эксперимент показал, что применение калибровочных поправок в имитаторе сигналов ГНСС обеспечивает выполнение требования к погрешности формирования разности фаз несущих частот сигналов НКА $5,3^\circ$.

3.3 Выводы

1. Разработан новый метод определения калибровочных поправок к воспроизводимым имитатором сигналов ГНСС разностям фаз несущих частот сигналов навигационных космических аппаратов. В отличие от существующего метода калибровки по интервалу времени между немодулированными гармоническими несущими, новый метод основан на использовании двухканального высокочастотного аналого-цифрового преобразователя с последующей демодуляцией выборок сигналов НКА для определения участков выборок с линейным изменением фазы.

4. Обеспечено значение расширенной неопределенности определения калибровочных поправок к воспроизводимым имитатором сигналов ГНСС разностям фаз несущих частот сигналов навигационных космических аппаратов ($k=3$) 1° . Метод позволяет обеспечить требуемую точность

формирования разности фаз для существующих типов имитаторов сигналов ГНСС.

5. Для использования разработанного метода должны быть выполнены следующие условия:

- имитатор сигналов ГНСС должен быть предварительно откалиброван в части определения действительных значений формируемых задержек по фазе дальномерного кода с расширенной неопределенностью менее $\frac{1}{4}$ от длины волны несущей воспроизводимого сигнала;

- амплитуда навигационных сигналов, формируемых имитатором сигналов ГНСС, должна быть не менее 0,64 В;

- возможность формирования имитатором сигнала одного НКА с нулевой дальностью и доплеровским смещением частоты одновременно с двух РЧ-выходов;

- имитатор должен иметь возможность формирования сигнала одного НКА с нулевыми значениями дальности и доплеровского смещения частоты;

- частота дискретизации АЦП должна быть не ниже 20 ГГц;

- количество каналов АЦП должно быть не менее 2-х;

- для получения результата измерения разности фаз длительность участка линейного изменения фазы сигналов должна быть не менее 200 нс.

4. Разработка метода передачи единицы плоского угла без демонтажа угломерной НАП в полевых условиях

Несоответствие текущего состояния методов и средств, необходимых для аттестации составной части рабочего эталона координат местоположения первого разряда, определения углов пространственной ориентации объектов установки УНАП для её начальной юстировки, оценки точностных характеристик в полевых условиях предъявляемым требованиям, предлагается разрешить путем заимствования рабочих эталонов из Государственной поверочной схемы единицы плоского угла [46] и разработки метода косвенных измерений.

Метод определения углов пространственной ориентации с использованием средств измерений геометрических величин (тахеометра) заключается в последовательном выполнении следующих операций:

- 1) размещение геодезических отражателей (марок отражательных) на строительных осях объекта размещения УНАП или прямых, коллинеарных строительным осям. С места установки тахеометра должны быть видны марки отражающие, закрепляющие строительную ось объекта;
- 2) начальная инициализация тахеометра в плоскости местного горизонта и на направление, для которого известно значение геодезического азимута;
- 3) измерения тахеометром дальностей и плоских углов до геодезических отражателей (марок отражательных);
- 4) расчет углов курса, крена и тангажа по данным результатов измерений тахеометра.

Далее последовательно рассмотрены все перечисленные операции разработанного метода.

4.1 Размещение геодезических отражателей (марок отражательных) на объекте установки УНАП

Для реализации метода определения углов пространственной ориентации объекта установки УНАП с использованием средств измерений геометрических величин, необходимо разместить отражатели (марки) на предварительно подготовленных посадочных площадках, закрепляющих направления, коллинеарные строительным осям объекта. Это возможно сделать тремя следующими способами:

- закрепить отражатель между объектом размещения и антенной УНАП на весь период эксплуатации (рисунок 4.1);



Рисунок 4.1 – Размещение отражателя под антенной УНАП

- на время проведения измерений демонтировать антенны УНАП и разместить на их посадочных винтах геодезические отражатели (рисунок 4.2);



а)



б)

Рисунок 4.2 – Размещение отражателя на винте крепления антенны УНАП

- использовать марки отражающие (рефлекторные) (рисунок 4.3)



Рисунок 4.3 – Внешний вид марок отражающих (рефлекторных)

Первый вариант влечет за собой усложнение конструкции за счет использования малонадежного (стеклянного) элемента. Второй вариант требует демонтажа составных частей УНАП с объекта размещения, что является трудозатратным мероприятием и может привести к уменьшению срока службы УНАП.

С целью исследования возможности использования марок рефлекторных вместо отражателей геодезических, был проведен эксперимент по измерению дальностей и плоских углов до отражательной призмы GPH1P и марки рефлекторной фирмы Leica.

Тахеометр и отражатель геодезический с наклеенной на него маркой рефлекторной (рисунок 4.4) размещались на относительном расстоянии до 20 метров.

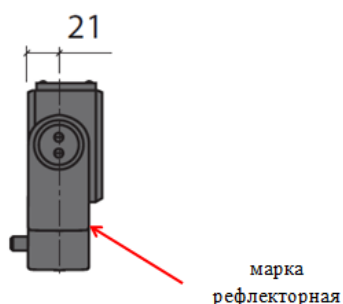


Рисунок 4.4 – Размещение марки рефлекторной на отражателе

Так как марка наклеена на переднюю панель отражателя (минус 21 мм от измеряемого расстояния) и собственная константа

уменьшения расстояния маркой 34,4 мм [47], то к измеренному до марки значению длины добавлялись 55,4 мм для сравнения со значением длины, измеренным до отражателя (собственная константа изменения расстояния отражателем GRN1P равна нулю) [48]. Экспериментально подтверждено, что на расстояниях до 20 метров марка рефлекторная не вносит дополнительную погрешность в результат определения углов пространственной ориентации.

4.2 Определение геодезического азимута направления «тахеометр-опорный пункт»

Для того, чтобы с использованием результатов измерений тахеометра рассчитать значение угла курса, необходимо предварительно инициализировать тахеометр на «опорный» пункт, для направления на который известно значение геодезического азимута. В качестве «опорного» пункта на местности можно использовать штатив геодезический с установленным на нём отражателем. Работы по определению геодезического азимута необходимо проводить в начале и в конце сессии измерений по разработанной методике (для контроля стабильности установки штативов геодезических на подстилающей поверхности).

Геодезический азимут направления «тахеометр-опорный» пункт может быть определен с использованием комплекта спутниковой геодезической аппаратуры [48, 49] или с использованием платформы геодезической [50].

Геодезическую платформу при «нелабораторном применении с достаточно удаленными объектами» [51] необходимо повторно калибровать после транспортирования. Для обеспечения универсальности применения разработанного метода, целесообразно использовать для этих целей спутниковую геодезическую аппаратуру.

На спутниковую геодезическую аппаратуру ни при испытаниях в целях утверждения типа, ни производителями, не нормируется погрешность измерения геодезического азимута. Необходима калибровка спутниковой

геодезической аппаратуры с использованием платформы геодезической для нормирования характеристики измерения геодезического азимута.

Калибровка может быть проведена методом сравнения (с указанием в сертификате калибровки расстояния между полукомплектами спутниковой геодезической аппаратуры при котором получено действительное значение геодезического азимута).

В бюджете неопределенности разрабатываемого метода, помимо точностных характеристик платформы геодезической, необходимо учесть отсутствие априорной информации о величине уклонения отвесной линии (УОЛ) в месте проведения работ с откалиброванным комплектом спутниковой геодезической аппаратуры. Результаты измерений платформой геодезической и спутниковой геодезической аппаратурой отличаются на величину проекции УОЛ на плоскость первого вертикала [52]. Для равнинной местности значение УОЛ не превышает 10" [52]. В дальнейшем будем использовать это значение как предел погрешности измерения УОЛ в бюджете неопределенности метода.

4.3 Порядок проведения измерений и расчет значений углов пространственной ориентации

4.3.1 Порядок проведения измерений и расчет угла курса

Определение значения угла курса проводится в следующем порядке:

1) объект установки УНАП и тахеометр размещаются согласно схеме, приведенной на рисунке 4.6 так, чтобы обеспечить видимость марок рефлекторных с места расположения тахеометра. Перед проведением измерений тахеометр необходимо отгоризонтировать. Использовать необходимо только типы тахеометров для которых предел допускаемой систематической составляющей погрешности компенсации компенсатора не превышает 1,5";

2) тахеометр инициализируется на опорный пункт;

3) измеряются тахеометром дальности до марок рефлекторных (R_1 (TO_1), R_2 (TO_2)) и углы в горизонтальной и вертикальной плоскостях (A_1 , A_2 и Γ_1 , Γ_2) соответственно.

Угол курса (α) (исходя из рисунка 4.6) рассчитывается по формуле (4.1):

$$A = 2\pi - A_0 \quad (4.1)$$

где $A_0 = A_2 - \angle O_2' T O_2 - A_N$, рад (следует из построений на рисунке 4.5).

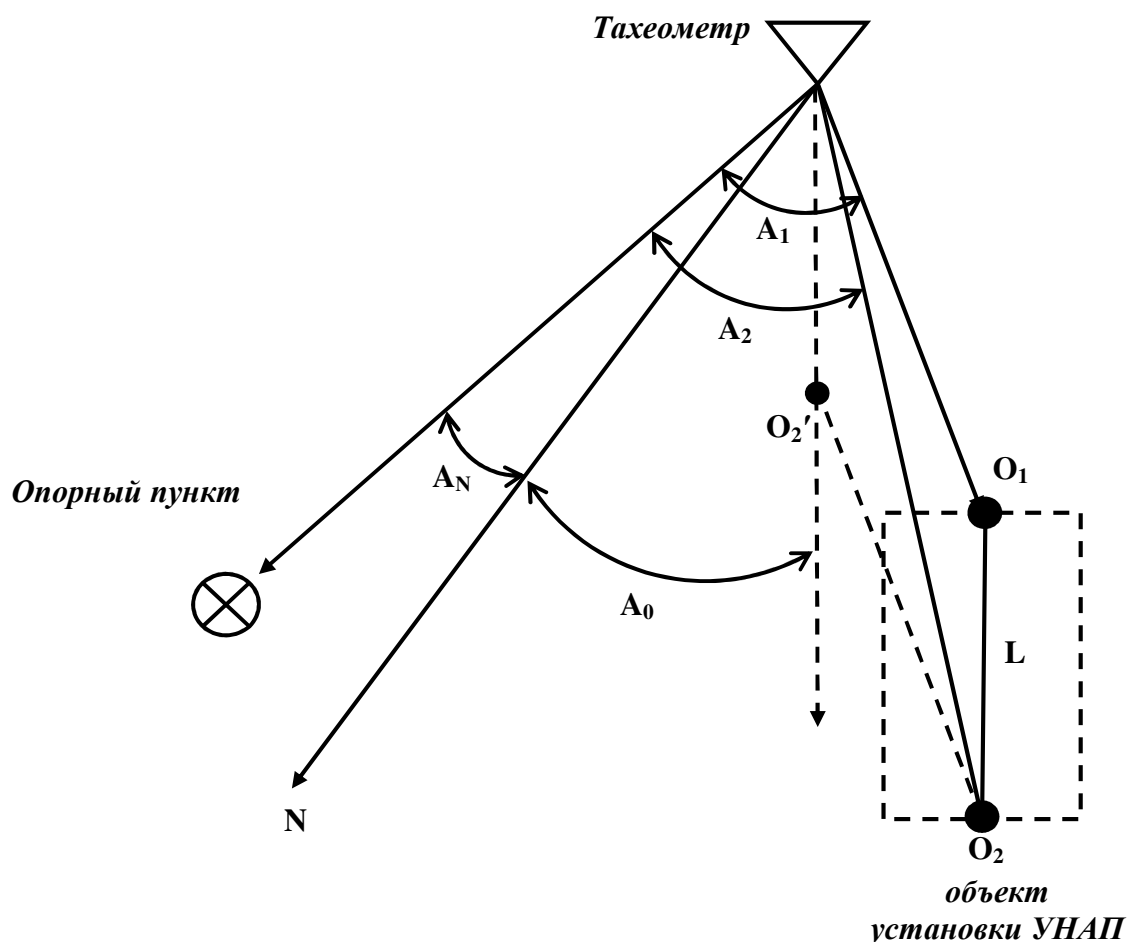


Рисунок 4.5 - Схема проведения измерений при определении угла курса

Учитывая, что $TO_2' \parallel O_1O_2$, для треугольника TO_1O_2 можно записать выражение:

$$\frac{\sin(A_1 - A_2)}{L_\Gamma} = \frac{\sin(\angle O_2' T O_2)}{R_1 \cos \Gamma_1} \quad (4.2)$$

где $L_\Gamma = \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}$ - проекция отрезка $O_1 O_2$ на горизонтальную плоскость.

Из выражения (4.2) следует, что

$$\angle O_2' T O_2 = \arcsin \left(\frac{R_1 \cos \Gamma_1}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}} \sin(A_1 - A_2) \right) \quad (4.3)$$

Таким образом, результирующее выражение для расчета угла курса имеет следующий вид:

$$\alpha = 2\pi - A_2 + A_N + \arcsin \left(\frac{R_1 \cos \Gamma_1}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}} \cdot \sin(A_1 - A_2) \right) \quad (4.4)$$

4.3.2 Порядок проведения измерений и расчет углов крена и тангажа

Тахеометр размещается относительно объекта установки УНАП согласно схемам, представленным на рисунках 4.6 и 4.7.

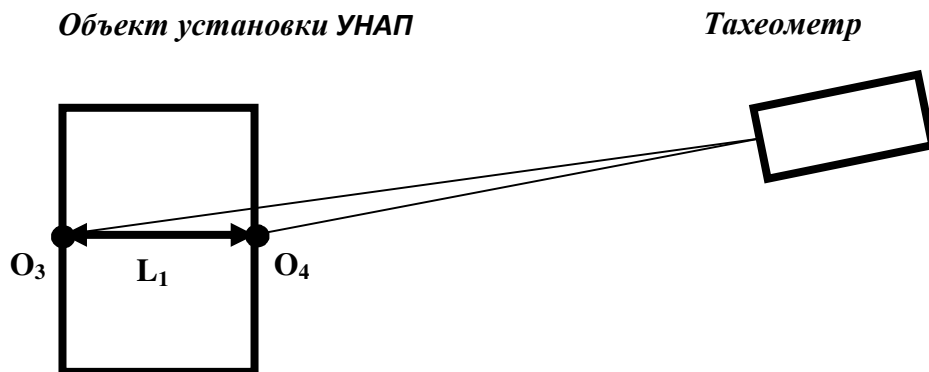


Рисунок 4.6 - Схема проведения измерений при определении угла крена

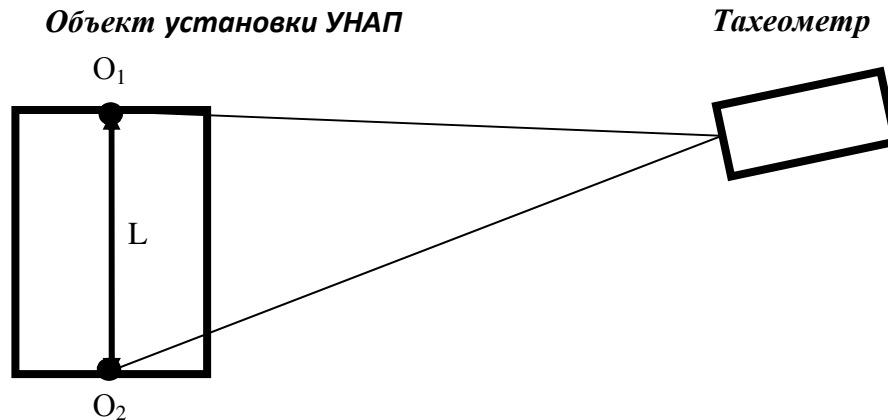


Рисунок 4.7 - Схема проведения измерений при определении угла тангажа

Проведя измерения с помощью тахеометра наклонных дальностей ($R_1 - R_4$) и углов в вертикальной ($\Gamma_1 - \Gamma_4$) плоскости до точек $O_1 - O_4$, определяется угол крена (формула (4.5)) и тангажа (формула 4.6):

$$\gamma = \arcsin \left(\frac{R_3 \cdot \sin \Gamma_3 - R_4 \cdot \sin \Gamma_4}{L_1 \cos \beta} \right) \quad (4.5)$$

где L_1 – расстояние между марками отражающими.

$$\beta = \arcsin \left(\frac{R_1 \cdot \sin \Gamma_1 - R_2 \cdot \sin \Gamma_2}{L \cos \gamma} \right) \quad (4.6)$$

где L – расстояние между марками отражающими.

Предложенные методы определения углов пространственной ориентации являются косвенными. Для определения погрешности метода необходимо провести анализ погрешностей косвенных измерений.

4.4 Бюджет неопределенности метода

4.4.1 Бюджет неопределенности метода – угол курса

Для реализации метода использовались следующие измерительные средства:

- гиropлатформа геодезическая GYROMAT 5000 (рег. № 62377-15): пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений азимута $\pm 2,6''$;

- тахеометр электронный высокоточный [46] – рабочий эталон второго разряда по ГПС для средств измерений плоского угла: доверительные границы абсолютной погрешности измерения плоского угла при доверительной вероятности 0,99: 0,5" и 1";

В соответствии с [43] и моделью измерений (4.4), расширенная неопределенность калибровки при коэффициенте охвата 2 определяется по формуле (4.7) [43]:

$$U = 2 \cdot \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + (c \cdot u_4)^2 + u_5^2 + u_A^2} \quad (4.7)$$

где u_1 – стандартная неопределенность измерения азимута гиротеодолитом;

u_2 – стандартная неопределенность, обусловленная погрешностью измерения УОЛ в месте проведения измерений, угловые секунды;

u_3, u_4 – стандартные неопределенности измерения тахеометром углов A_2 и $(A1-A2)$, угловые секунды;

u_5 – стандартная неопределенность измерения угла, обусловленная погрешностью компенсатора тахеометра, угловые секунды;

u_A – стандартная неопределенность по типу А (определена экспериментально), угловые секунды.

Измерения угла курса являются косвенными, проведем расчет коэффициентов чувствительности.

4.4.1.1 Расчет коэффициента чувствительности

Найдем частные производные угла курса по измеряемым величинам:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial R_1} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \cos \Gamma_1}{L_\Gamma} \sin(A_1 - A_2) \right)^2}} \cdot \frac{\cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2)}{L_\Gamma} \left(1 - \frac{R_1}{L_\Gamma^2} \sin \Gamma_1 (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1) \right) \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial R_2} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \cos \Gamma_1}{L_\Gamma} \sin(A_1 - A_2) \right)^2}} \cdot \frac{R_1 \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2)}{L_\Gamma^3} (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1) \sin \Gamma_2 \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial (A_1 - A_2)} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \cos \Gamma_1}{L_\Gamma} \sin(A_1 - A_2) \right)^2}} \cdot \frac{R_1 \cos \Gamma_1}{L_\Gamma} \cos(A_1 - A_2) \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \Gamma_1} = - \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \cos \Gamma_1}{L_\Gamma} \sin(A_1 - A_2) \right)^2}} \cdot \frac{R_1 \sin(A_1 - A_2)}{L_\Gamma^3} (L_\Gamma^2 \sin \Gamma_1 + R_1 \cos^2 \Gamma_1 \cdot (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)) \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \Gamma_2} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \cos \Gamma_1}{L_\Gamma} \sin(A_1 - A_2) \right)^2}} \cdot \frac{R_1 \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2)}{L_\Gamma^3} (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1) R_2 \cos \Gamma_2, \quad (4.12)$$

где $L_\Gamma = \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}$.

Вывод формул (4.8) – (4.12) приведен в Приложении А.

Так как во всех выражениях присутствует множитель

$\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \cos \Gamma_1}{L_\Gamma} \sin(A_1 - A_2) \right)^2}}$, то становится очевидным условие проведения

измерений, при которых погрешность косвенных измерений минимальна. Таким условием является минимизация параметра $(A_1 - A_2)$:

$$U \xrightarrow{(A_1 - A_2) \rightarrow 0} \min \quad (4.13)$$

Из выражения (4.13) следует, что тахеометр должен располагаться как можно ближе к строительной оси объекта. При минимизации параметра $(A_1 - A_2)$ можно принять следующее приближенные равенства:

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \cos \Gamma_1}{L_\Gamma} \sin(A_1 - A_2) \right)^2}} \approx 1$$

$$\frac{\partial D}{\partial R_1} \approx 0$$

$$\frac{\partial D}{\partial R_2} \approx 0$$

$$\frac{\partial D}{\partial \Gamma_1} \approx 0$$

$$\frac{\partial D}{\partial \Gamma_2} \approx 0$$

Тогда выражение для $\frac{\partial \alpha}{\partial (A_1 - A_2)}$ (коэффициент чувствительности при измерении угла $(A_1 - A_2)$) примет вид:

$$c = \frac{\sqrt{2} R_1 \cos \Gamma_1}{L_\Gamma}$$

Так как коэффициент чувствительности вычисляется для разности измерений углов A_1 и A_2 , дополнительно введен множитель $\sqrt{2}$.

Если дополнительно выполняется условие размещения тахеометра и объекта испытаний приблизительно на одной высоте ($\cos \Gamma_1 \approx 1$, L_Γ соответствует фактическому расстоянию между антеннами) можно записать:

$$c = \frac{R_1 \sqrt{2}}{L} \quad (4.14)$$

Бюджет неопределенности разработанного метода в части определения угла курса приведен в таблице 4.1.

Стандартная неопределенность по типу А измерения угла курса разработанным методом определена экспериментально (раздел 4.4.3), значения неопределенности по типу А не превышают 0,7" (для тахеометра с $u = 0,3''$) и 0,9" (для тахеометра с $u = 0,6''$).

Таблица 4.1 - Бюджет неопределенности метода – угол курса

Источник неопределенности	Тип	Значение входной величины	Вероятностное распределение	Делитель	Коеф. чувствительности	Значение
Погрешность измерения азимута гиротеодолитом	В	2,6"	Равномерное	$\sqrt{3}$	1	1,5"
Погрешность измерения уклона отвесной линии	В	10"	Равномерное	$\sqrt{3}$	1	6"
Погрешность измерения угла A_2	В	0,5"/1"	Равномерное	$\sqrt{3}$	1	0,3"/0,6"
Погрешность измерения угла (A_1-A_2)	В	0,5"/1"	Равномерное	$\sqrt{3}$	$R\sqrt{2}/L$	
Погрешность компенсатора тахеометра	В	1,5"	Равномерное	$\sqrt{3}$	1	1"

Источник неопределенности	Тип	Значение входной величины	Вероятностное распределение	Делитель	Коэф. чувствительности	Значение
Случайная погрешность	A	0,7"/0,9"	Нормальное		1	0,7"/0,9"

На рисунке 4.8 приведены значения расширенной неопределенности метода, рассчитанные по формуле (4.7), в зависимости от стандартной неопределенности тахеометра и расстояния между тахеометром и объектом. В расчетах принято расстояние между марками рефлаторными 1 м).

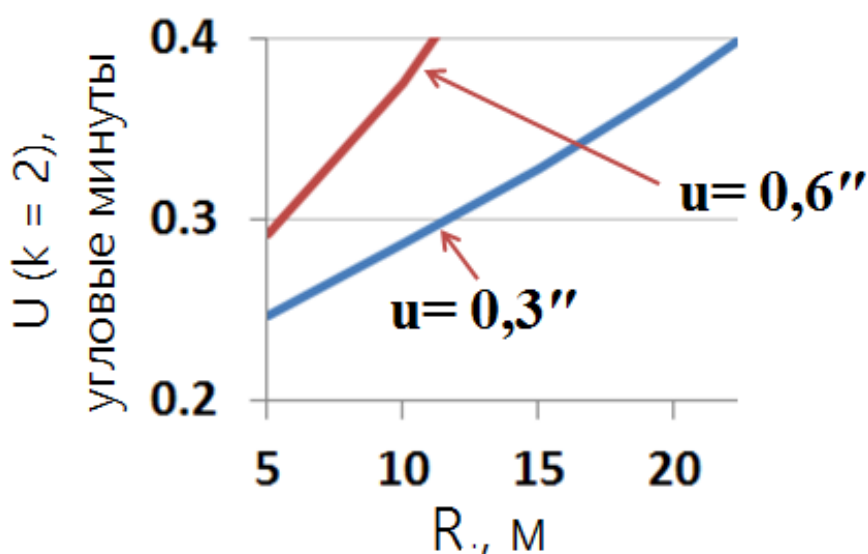


Рисунок 4.8 – Расширенная неопределенность разработанного метода (угол курса)

Требуемое значение расширенной неопределенности метода ($\leq 0,35'$) в части определения угла курса обеспечивается образцами тахеометров, имеющих стандартную неопределенность измерения угла не более 0,3" и при удалении тахеометра от объекта не далее 18 м.

4.4.2 Бюджет неопределенности метода – углы крена и тангажа

Для реализации метода использовались следующие измерительные средства:

- тахеометр электронный высокоточный [46] – рабочий эталон второго разряда по ГПС для средств измерений плоского угла: доверительные

границы абсолютной погрешности измерения плоского угла при доверительной вероятности 0,99: 0,5" и 1";

В соответствии с [43] и моделями измерений (4.5, 4.6), расширенная неопределенность калибровки при коэффициенте охвата 2 определяется по формуле (4.15) [43]:

$$U = 2 \cdot \sqrt{u_1^2 + (c \cdot u_2)^2 + (c \cdot u_3)^2 + u_A^2} \quad (4.15)$$

где u_1 – стандартная неопределенность измерения угла, обусловленная погрешностью компенсатора тахеометра, угловые секунды;

u_2 – стандартная неопределенность измерения углов Γ_1 (Γ_3), угловые секунды;

u_3 – стандартная неопределенность измерения углов Γ_2 (Γ_4), угловые секунды;

u_A – стандартная неопределенность по типу А (определена экспериментально), угловые секунды.

Измерения углов крена и тангажа являются косвенными, проведем расчет коэффициентов чувствительности.

4.4.2.1 Расчет коэффициента чувствительности

Найдем частные производные углов крена и тангажа по измеряемым величинам. При проведении горизонтирования объекта значения $\cos\beta$, $\cos\gamma$ в знаменателях формул (4.5), (4.6) можно считать равными 1:

$$\frac{\partial(\beta, \gamma)}{\partial R_1} = \frac{\sin \Gamma_1}{L \sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \sin \Gamma_1 - R_2 \sin \Gamma_2}{L \cos(\beta, \gamma)} \right)^2}}$$

$$\frac{\partial(\beta, \gamma)}{\partial R_2} = - \frac{\sin \Gamma_2}{L \sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \sin \Gamma_1 - R_2 \sin \Gamma_2}{L \cos(\beta, \gamma)} \right)^2}}$$

$$\frac{\partial(\beta, \gamma)}{\partial \Gamma_1} = \frac{R_1 \cos \Gamma_1}{L \sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \sin \Gamma_1 - R_2 \sin \Gamma_2}{L \cos(\beta, \gamma)} \right)^2}}$$

$$\frac{\partial(\beta, \gamma)}{\partial \Gamma_2} = - \frac{R_2 \cos \Gamma_2}{L \sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \sin \Gamma_1 - R_2 \sin \Gamma_2}{L \cos(\beta, \gamma)} \right)^2}}$$

При размещении тахеометра и объекта установки УНАП приблизительно на одной высоте $(\sin \Gamma_1, \sin \Gamma_2) \rightarrow 0$, $(\cos \Gamma_1, \cos \Gamma_2) \rightarrow 1$. При таких начальных условиях можно записать следующие равенства:

$$\frac{1}{L \sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \sin \Gamma_1 - R_2 \sin \Gamma_2}{L \cos(\beta, \gamma)} \right)^2}} \approx \frac{1}{L}$$

$$\frac{\partial(\beta, \gamma)}{\partial R_1} \approx 0$$

$$\frac{\partial(\beta, \gamma)}{\partial R_2} \approx 0$$

$$\frac{\partial(\beta, \gamma)}{\partial \Gamma_1} \approx \frac{R_1}{L}$$

$$\frac{\partial(\beta, \gamma)}{\partial \Gamma_2} \approx - \frac{R_2}{L}$$

Выражение для определения коэффициента чувствительности:

$$c = \frac{R}{L}$$

Бюджет неопределенности разработанного метода в части определения углов крена и тангажа приведен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Бюджет неопределенности метода – углы крена и тангажа

Источник неопределенности	Тип	Значение входной величины	Вероятностное распределение	Делитель	Коэф. чувствительности	Значение
Погрешность измерения углов Г1 – Г4	В	0,5"/1"	Равномерное	$\sqrt{3}$	R/L	0,3"/0,6"
Погрешность компенсатора тахеометра	В	1,5"	Равномерное	$\sqrt{3}$	1	1"
Случайная погрешность	А	0,7"/0,9"	Нормальное			0,7"/0,9"

На рисунке 4.9 приведены значения расширенной неопределенности метода, рассчитанные по формуле (4.15), в зависимости от стандартной неопределенности тахеометра и расстояния между тахеометром и объектом. В расчетах принято расстояние между марками рефлекторными 1 м).

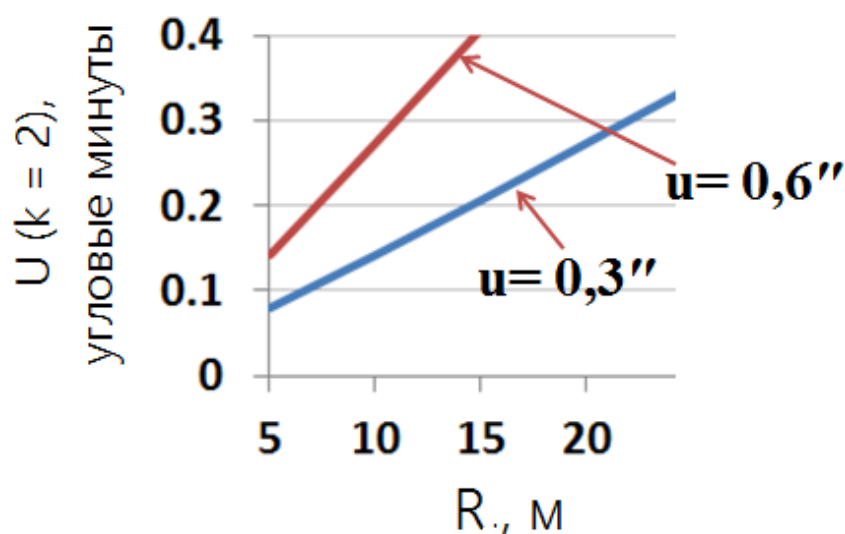


Рисунок 4.9 – Расширенная неопределенность разработанного метода (углы крена, тангажа)

Требуемое значение расширенной неопределенности метода ($\leq 0,35''$) в части определения углов крена (тангажа) может быть обеспечено при условии использования тахеометров имеющих стандартную неопределенность измерения угла не более $0,6''$ и на удалении тахеометра от объекта не более 13 м.

4.4.3 Опробование разработанного метода

Для опробования разработанного метода использовалась встроенная функция гиropлатформы геодезической GYROMAT 5000 по переносу ориентирных направлений.

Угол курса был закреплен в пространстве двумя геодезическим отражателями (рисунок 4.10). Значение угла курса вначале было определено гиropлатформой геодезической (с использованием встроенного программного обеспечения производителя), а затем разработанным методом с использованием двух типов тахеометров, предварительно инициализированными в плоскости горизонта и на опорный пункт.

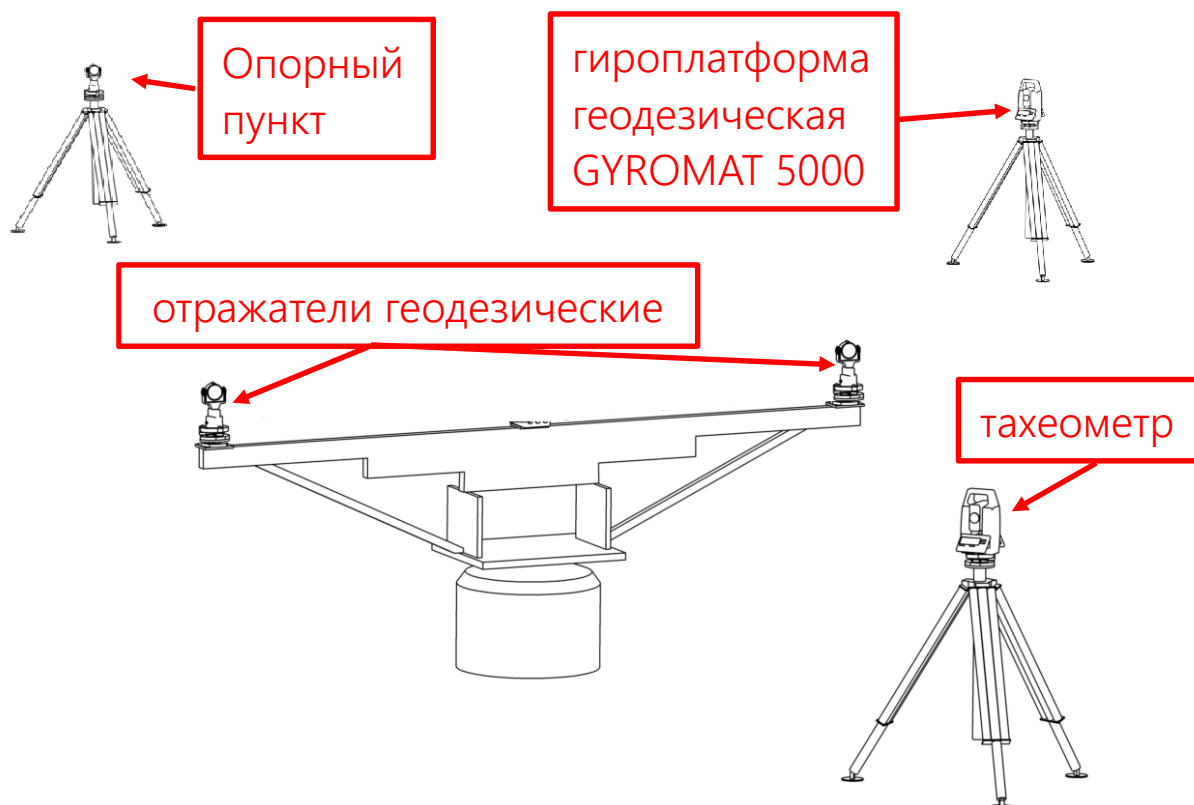


Рисунок 4.10 – Схема натурного эксперимента по определению погрешности измерения углов пространственной ориентации разработанным методом

Результаты эксперимента по определению погрешности измерения углов пространственной ориентации разработанным методом представлены в таблице 4.3 и рисунке 4.11.

Таблица 4.3 - Результаты эксперимента

№ п/п	Результат измерения угла курса гиropлатформой	Результат измерения угла курса тахеометром ($u=0,3''$)	Погрешность измерения угла курса разработанным методом (тахеометр с $u=0,3''$)	Результат измерения угла курса тахеометром ($u=0,6''$)	Погрешность измерения угла курса разработанным методом (тахеометр с $u=0,6''$)
1	172°57'23,1"	172°57'24,9"	1,9"	172°57'24,6"	1,6"
2		172°57'24,8"	1,8"	172°57'24,9"	1,9"
3		172°57'24,6"	1,6"	172°57'25,6"	2,6"
4		172°57'25,5"	2,5"	172°57'26,3"	3,3"
5		172°57'25,9"	2,9"	172°57'25,9"	2,9"
6		172°57'25,7"	2,7"	172°57'24,1"	1,1"
7		172°57'24,5"	1,5"	172°57'25,5"	2,5"
8		172°57'26,2"	3,2"	172°57'26"	3"
9		172°57'25,6"	2,6"	172°57'24,7"	1,7"
10		172°57'24,2"	1,2"	172°57'25,5"	2,5"
11		172°57'26,5"	3,5"	172°57'25,8"	2,8"
12		172°57'26,8"	3,8"	172°57'25,6"	2,6"
13		172°57'25,4"	2,4"	172°57'24,7"	1,7"
14		172°57'24,7"	1,7"	172°57'23,8"	0,8"
15		172°57'25,2"	2,2"	172°57'23,7"	0,7"
16		172°57'26,6"	3,6"	172°57'26,4"	3,4"
17		172°57'25,8"	2,8"	172°57'24,7"	1,7"
18		172°57'26,1"	3,1"	172°57'26,7"	3,7"
19		172°57'26,7"	3,7"	172°57'23,4"	0,4"
20		172°57'25,7"	2,7"	172°57'24,8"	1,8"

№ п/п	Результат измерения угла курса гироплатформой	Результат измерения угла курса тахеометром ($\mu=0,3''$)	Погрешность измерения угла курса разработанным методом (тахеометр с $\mu=0,3''$)	Результат измерения угла курса тахеометром ($\mu=0,6''$)	Погрешность измерения угла курса разработанным методом (тахеометр с $\mu=0,6''$)
21		172°57'26,1"	3,1"	172°57'25,4"	2,4"
22		172°57'25,9"	2,9"	172°57'25,7"	2,7"
23		172°57'24,8"	1,8"	172°57'25,2"	2,2"
24		172°57'25,6"	2,6"	172°57'24,6"	1,6"
25		172°57'26,2"	3,2"	172°57'25,4"	2,4"
26		172°57'24,6"	1,6"	172°57'26,2"	3,2"
27		172°57'26,1"	3,1"	172°57'23,8"	0,8"
28		172°57'25,4"	2,4"	172°57'26,3"	3,3"
29		172°57'24,9"	1,9"	172°57'25,1"	2,1"
30	172°57'22,9"	172°57'25,6"	2,6"	172°57'24,4"	1,4"

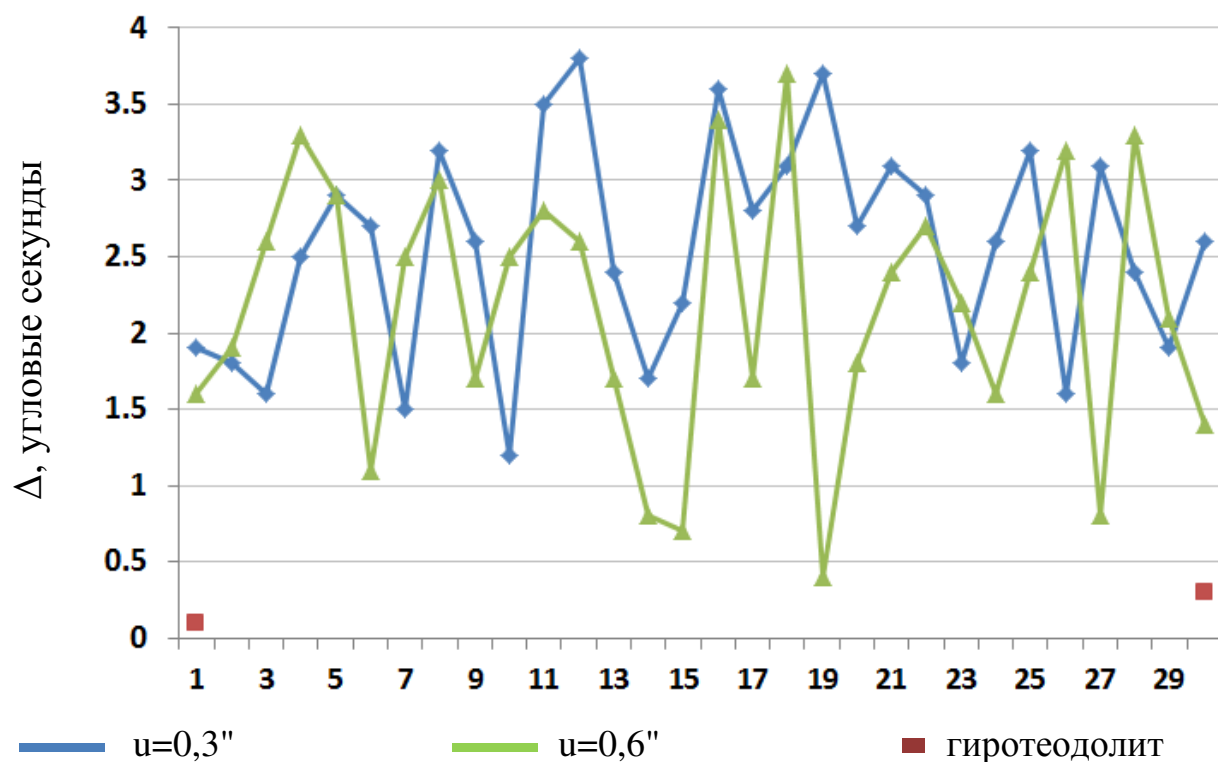


Рисунок 4.11 – Результаты эксперимента по определению погрешности измерения углов пространственной ориентации разработанным методом

Результаты эксперимента подтверждают возможность использования разработанного метода для аттестации рабочих эталонов и измерения углов пространственной ориентации объектов размещения УНАП с расширенной неопределенностью $0,35'$ на 1 м длины антенной базы при коэффициенте охвата 2 .

4.5 Выводы

1. Разработан новый метод передачи единицы плоского угла с использованием рабочих эталонов плоского угла (тахеометров) с расширенной неопределенностью $0,35'$ при коэффициенте охвата 2 .

2. Разработанный метод позволяет проводить аттестацию составной части рабочего эталона координат местоположения 1 разряда, поверку УНАП без демонтажа с объектов эксплуатации и обеспечивает заданную погрешность определения углов пространственной ориентации при начальной юстировке прецизионных образцов УНАП на объектах эксплуатации.

3. Для использования разработанного метода должны быть выполнены следующие условия:

- на объекте установки УНАП (или антеннах УНАП) должны быть предусмотрены посадочные площадки для размещения марок отражающих, закрепляющие направления, коллинеарные строительным осям объекта;

- с места установки тахеометра должны быть видны марки отражающие, закрепляющие строительную ось объекта;

- тахеометр должен располагаться как можно ближе к строительной оси объекта;

- расстояние между тахеометром и объектом не более 13 м;

- расстояние между марками отражающими, закрепляющими одну строительную ось объекта, не менее 1 м;

- использование тахеометров – рабочих эталонов плоского угла 2 разряда по ГПС для средств измерений плоского угла.

5. Метод начальной юстировки угломерной навигационной аппаратуры потребителей на объектах размещения

Основная задача начальной юстировки УНАП на объекте размещения заключается в определении значений «поворотов измерительных осей» УНАП, обеспечивающих однозначный пересчет значений углов пространственной ориентации, измеренных УНАП, в значения углов пространственной ориентации строительных осей объекта установки с учетом фактических значений углов крена и тангажа объекта. Цель начальной юстировки заключается в обеспечении определения поправок с погрешностью, не превышающей 30% от паспортных значений УНАП.

Процедура начальной юстировки УНАП включает четыре основных этапа:

- 1) определение углов пространственной ориентации объекта размещения УНАП;
- 2) накопление измерений УНАП на интервале наблюдения;
- 3) расчет систематических поправок;
- 4) ввод и учет полученных значений «поворотов измерительных осей» в ПО УНАП или объекта её размещения.

Для определения действительных значений углов пространственной ориентации объекта размещения УНАП используется тахеометр и метод, изложенный в главе 4 этой работы.

Для определения действительных значений углов пространственной ориентации объектов установки УНАП в разработанном методе используется тахеометр (глава 4). Рассмотрим подробнее процедуру накопления результатов измерений УНАП.

Уменьшение периода времени наблюдения и количества измерений УНАП, при сохранении значения погрешности начальной юстировки, возможно за счет уточнения условий проведения измерений и анализа медленно меняющейся составляющей этой погрешности.

5.1 Анализ условий проведения измерений

Разность фаз сигналов НКА в УНАП, обусловленная их многолучевым распространением, в общем виде зависит от длины волны несущей частоты (λ), расстояния между антеннами (L), геодезического азимута отражающей поверхности ($A_{оп}$), геодезического азимута антенной системы (A_d), угла места НКА (E) над горизонтом [53, 62]:

$$(\varphi - \varphi_0)_M = f(\lambda, L, A_d, A_{оп}, E)$$

Возможные траектории распространения отраженных сигналов НКА от подстилающей поверхности и вертикальных отражающих поверхностей представлены на рисунке 5.1. Здесь и далее рассматривается только однократное отражение сигналов НКА от каждой поверхности до момента их приема антенной УНАП.

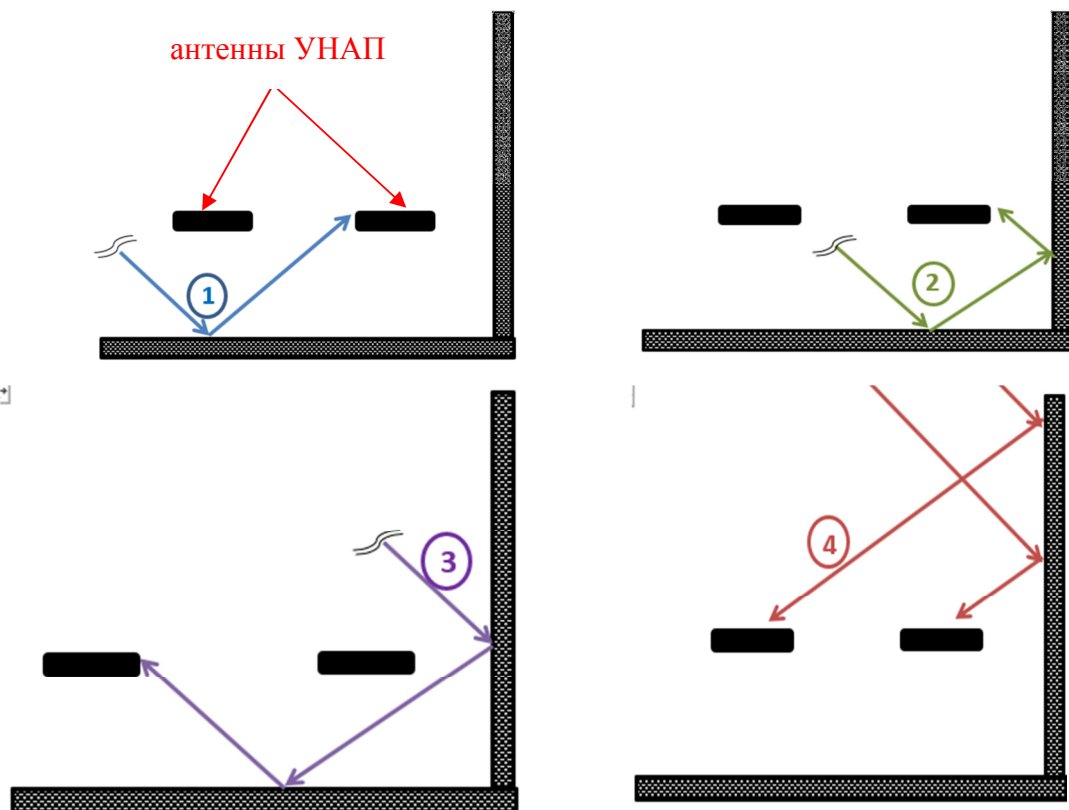


Рисунок 5.1 – Траектории многолучевого распространения сигналов НКА

Любые комбинации траекторий распространения отраженных сигналов НКА (с первой по четвертую) приводят к появлению полигармонической составляющей погрешности измерения углов в УНАП с априорно неизвестным периодом.

Если проведение измерений УНАП проводится в условиях открытой местности, т.е. при отсутствии вертикальных отражающих поверхностей, то период многолучевости, обусловленный распространением сигналов НКА только по траектории 1, можно представить выражением (5.1) [54, 55]:

$$T(\varphi - \varphi_0)_{Mi} = \sum_K \left[\frac{2\pi \cdot L}{K \cdot \lambda} \cdot \sin E_{Ki} \cdot |\dot{E}_{Ki}| \cdot \cos A_{Ki} \right]^{-1}, \quad (5.1)$$

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.

Расчет текущих значений периодов многолучевости по формуле (5.1) на восьмисуточном интервале представлен на рисунке 5.2. Как известно [56], трассы движения и зоны радиовидимости НКА ГЛОНАСС повторяются через 8 суток для стационарного наземной НАП.

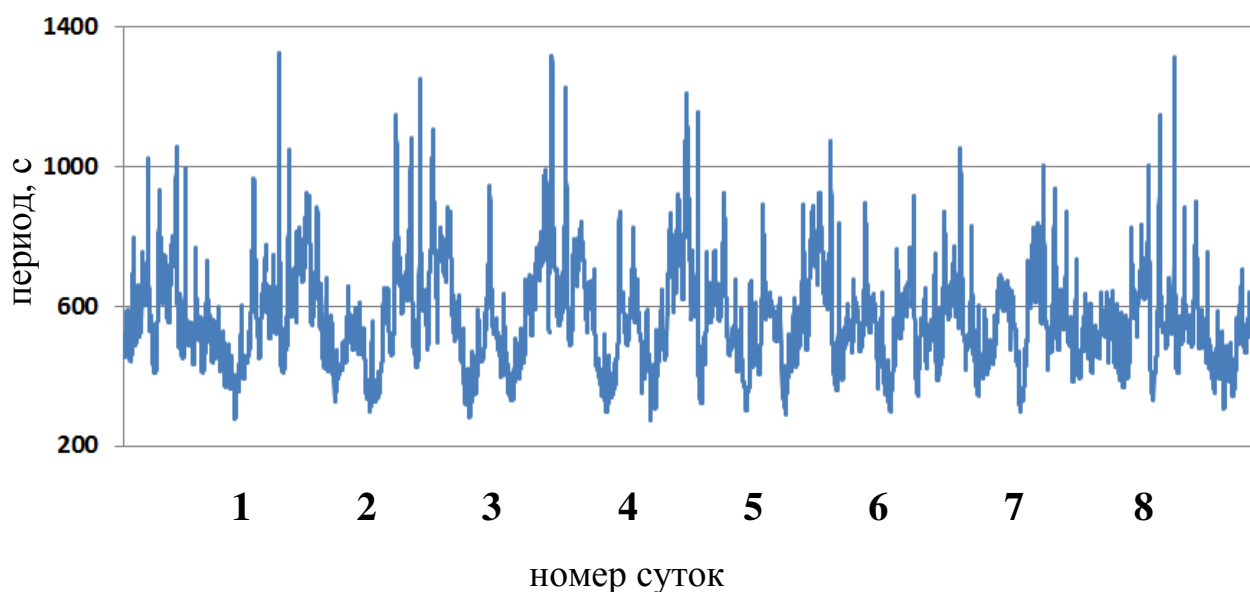


Рисунок 5.2 - Мгновенные значения периодов многолучевости

Как видно из рисунка 5.2, можно оценить среднее значение периода многолучевости, которое составляет приблизительно 560 с. Учет периодичности этого процесса переотражения сигналов НКА позволяет снизить влияние медленно меняющейся составляющей погрешности, обусловленной многолучевостью, на итоговую погрешность начальной юстировки. Для реализации этой возможности необходимо провести накопление результатов измерений углов пространственной ориентации с помощью УНАП на более длительных интервалах (определяется экспериментально для каждого типа УНАП и объекта размещения), а также использовать критерии проверки однородности средних в процессе обработки результатов измерений углов пространственной ориентации.

5.2 Выбор метода проверки однородности средних

Разработанный метод основан на проверке гипотезы о равенстве средних значений двух частей выборки $M_{ln} = M_{lm}$ (m, n – порядковый номер части выборки, l – количество отсчетов в выборке) при априорно заданной вероятности ошибки первого рода. В данной работе все исследования проведены для вероятности ошибки первого рода $\alpha = 0,01$.

Мощности критериев проверки однородности средних известны представлены в таблице 5.1 [57, 58, 59, 60].

Таблица 5.1 –Мощности критериев проверки однородности средних

Критерии		Мощность критерия при длине части выборки $l=100$ измерений и $\alpha \leq 0.01$			
		отличие средних значений			
		10%	20%	50%	100%
параметрические	t-критерий Стьюдента	0,053	0,179	0,882	1
	F-критерий	0,031	0,121	0,800	1
непараметрические	Манна-Уитни	0,051	0,170	0,865	1
	Краскела-Уаллиса	0,030	0,113	0,824	1

При достоверном знании того, что закон распределения случайной величины нормальный целесообразно использовать t-критерий Стьюдента. При неизвестном законе распределения (или в случае недостоверного его определения) целесообразно использовать непараметрические критерии, не привязанные к закону распределения, в частности критерий Вилкоксона.

Учитывая тот факт, что при начальной юстировке УНАП на объектах размещения количество измерений, как правило, превышает $N > 200$, допустимо использование нормального закона распределения [47]. Следовательно, в данном методе целесообразно использовать t-критерий Стьюдента, как обладающего наибольшей мощностью.

5.3 Обоснование необходимой длительности интервала измерений УНАП для разработанного метода

Количество измерений УНАП угла пространственной ориентации (темп записи измерений – 1 измерение в 1 с) (N), при котором составляющая 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 (5.2):

$$v(N) = \max(M_N - M_{N_{old}}) \leq 0,3 \cdot \Delta \quad (5.2)$$

где $M_N = \sum_{i=1}^N \frac{\gamma_i}{N}$ – математическое ожидание выборки длиной N , угловые минуты;

γ_i – измеренные УНАП значения угла пространственной ориентации, угловые минуты;

$M_{N_{old}} = \sum_{i=1}^{N_{old}} \frac{\gamma_i}{N_{old}}$ – математическое ожидание выборки длиной N_{old} , угловые минуты.

Значение N_{old} – количество измерений (интервал времени накопления результатов измерений) при угловой юстировке из документации УНАП.

На рисунке 5.2 представлены результаты обработки экспериментальных данных (расчеты по формуле (5.2)). По графику определено количество измерений (N), необходимых для обеспечения точности юстировки одного типа УНАП ($\Delta=3''$), установленного на конкретном объекте потребителя. Результаты измерений УНАП получены в условиях приема сигналов НКА без вертикальных отражающих поверхностей (на оси абсцисс количество измерений N). Все вертикальные отражающие поверхности с углом места более 5° находились на удалении не менее 1500 м от объекта (эквивалентно дополнительным 100 дБ ослабления сигналов НКА [61]).

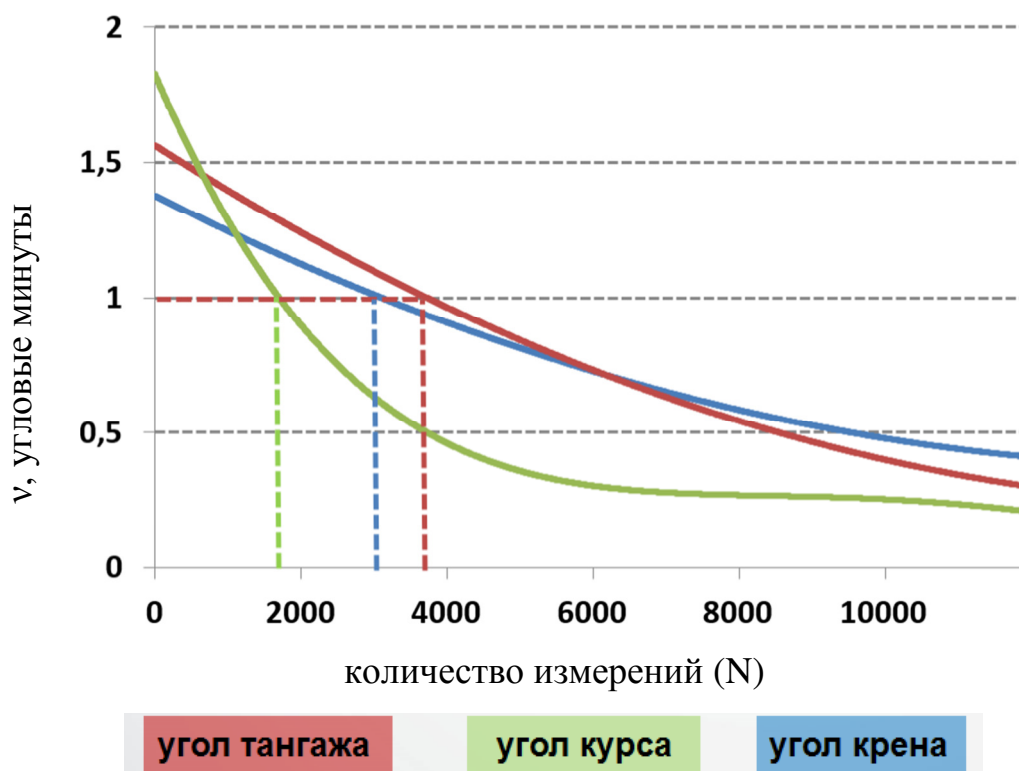


Рисунок 5.2 – Расчет длины интервала времени наблюдения при начальной юстировке УНАП

В разработанном методе юстировки количество измерений $l=N/2$ используется в качестве шага разработанного алгоритма. Как видно из графиков, представленных на рисунке 5.2, для углов тангажа и крена шаг алгоритма целесообразно выбрать равным $l=2000$ измерений (2000 с), для угла курса шаг алгоритма целесообразно выбрать равным $l=1000$ измерений (1000 с) (используются измерения углов пространственной ориентации УНАП с темпом 1 измерение в 1 с).

Определять шаг алгоритма необходимо для каждой комбинации «тип УНАП – объект» один раз при первом размещении серийного экземпляра УНАП на объекте потребителя.

Таким образом, разработанный метод начальной юстировки УНАП состоит из следующих основных этапов:

Этап 1: Обеспечение отсутствия вертикальных отражающих поверхностей.

Этап 2: Определение углов пространственной ориентации объекта установки УНАП с использованием рабочего эталона плоского угла на базе тахеометра.

Этап 3: Накопление измерений УНАП.

Этап 4: Проверка гипотезы (H_0) о равенстве средних двух частей выборки ($\alpha=0.01$) по t-критерию Стьюдента. Если гипотеза верна, то вычисляется математическое ожидание результатов измерений УНАП на интервале выборки длительностью $2l$ (для вычисления математического ожидания используются результаты измерений УНАП на которых проверялась гипотеза о равенстве средних значений). Вычисленное значение используется для расчета юстировочной поправки. Если гипотеза не верна, то выполняется этап 5.

Этап 5: Сравнение фактического интервала времени накопления результатов измерений УНАП в эксперименте (T_Σ) с рекомендуемым разработчиком для данного типа УНАП значением интервала времени накопления результатов измерений из документации УНАП (T_{old}). Если интервал T_Σ превысил по величине половину интервала T_{old} , то далее разработанный алгоритм не применяется, данные накапливаются без анализа до T_{old} . Разработанный алгоритм применяется при условии $T_\Sigma \leq 0,5 \cdot T_{old}$. Если $T_\Sigma \leq 0,5 \cdot T_{old}$, то выполняется этап 3.

Блок схема этапов 4 и 5 метода начальной юстировки представлена на рисунке 5.3.

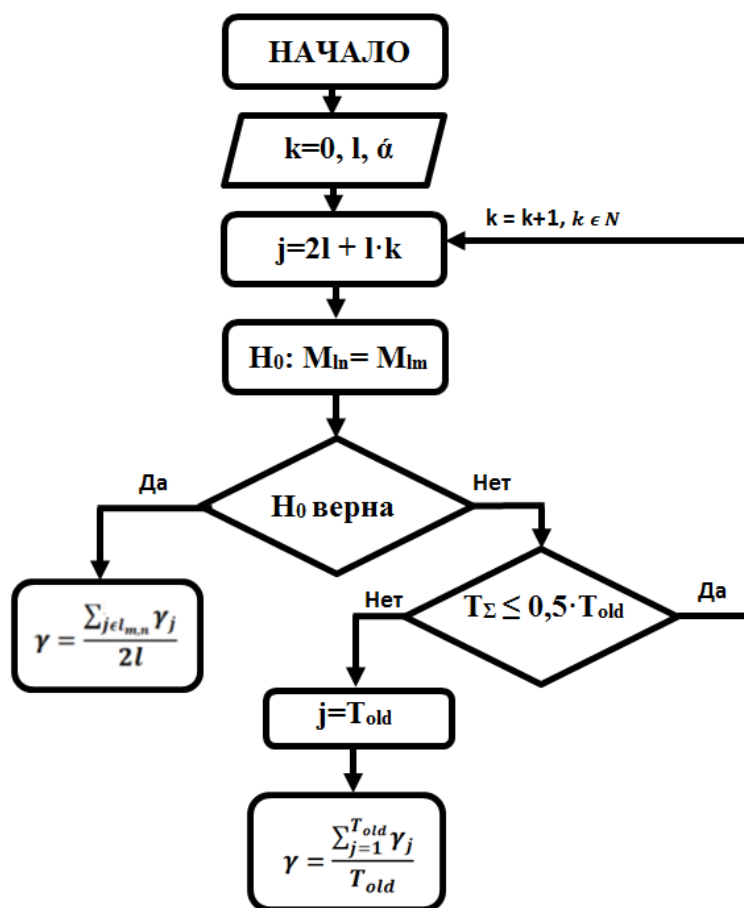


Рисунок 5.3 – Блок-схема этапов 4 и 5
разработанного метода начальной юстировки

На рисунке 5.3:

α – вероятность ошибки первого рода (задается априорно);

H_0 – гипотеза о равенстве средних двух частей выборки длиной l каждая ($l > 200$ измерений);

M – среднее значение выборки;

n, m – порядковый номер части выборки;

γ – определяемое значение угла пространственной ориентации

T_Σ – интервал времени накопления результатов измерений УНАП;

T_{old} – типовое значение интервала времени накопления результатов измерений из документации УНАП.

5.4 Экспериментальное исследование разработанного метода

Разработанный метод был опробован при проведении работ по начальной юстировке измерительных осей УНАП – аппаратура МРК-101 относительно строительных осей макета гондолы беспилотного разведывательного гибридного многофункционального дирижабля (БРГД) (рисунок 5.4).

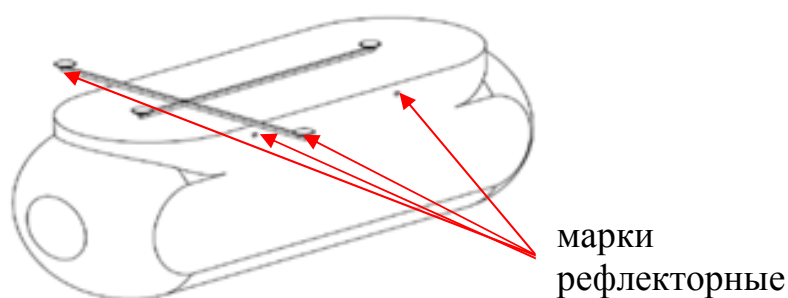


Рисунок 5.4 – Макет гондолы БРГД

В соответствии с документацией фирмы-изготовителя аппаратуры МРК-101 [34] погрешность (при доверительной вероятности 0,95) определения пространственной ориентации антенной системы изделием по углу курса $\pm 6'$, по углам крена и тангажа $\pm 6'$.

Перед началом выполнения работ по опробованию разработанного метода начальной юстировки УНАП на объекте размещения были проведены подготовительные работы:

- выбрано место размещения без вертикальных отражающих поверхностей;
- установлены штативы геодезические и определен геодезический азимут с первого штатива на второй;
- на характерные точки объекта установки, закрепляющие строительные оси макета гондолы, наклеены марки рефлекторные (рисунок 5.4);

- макет гондолы установлен относительно первого штатива геодезического таким образом, чтобы с места установки штатива геодезического видны все марки рефлекторные (рисунок 5.5).



Рисунок 5.5 – Взаимное размещение макета БРГД и тахеометра электронного

Тахеометр электронный ТСА2003 из состава государственного первичного специального эталона единицы длины ГЭТ 199-2018 был установлен на первый штатив и проведена начальная выставка тахеометра в плоскости местного горизонта и на известный опорный пункт.

Тахеометром электронным были проведены измерения наклонных дальностей, вертикальных и горизонтальных углов до марок рефлекторных. По результатам обработки измерений тахеометра были получены действительные значения углов пространственной ориентации объекта размещения УНАП (макета гондолы БРГД) (таблица 5.2, столбец 2).

Таблица 5.2 – Результаты экспериментов

№ п/п	Измеренное значение угла		Разность поправок, систематических существующим и разработанным методами измеренному значению угла	Время измерения существующим методом, с	Время измерения разработанным методом, с	Уменьшение времени проведения измерений
	существующим методом	разработанным методом				
Угол курса						
1	172,0357°	172,0426°	-0,4'	18000	8000	в 2,2 раза
2	172,0331°	172,0426°	-0,6'			
Угол крена						
1	-0,7925°	-0,8132°	1,2'	18000	8000	в 2,2 раза
2	-0,8097°	-0,8247°	0,9'			
Угол тангажа						
1	0,1674°	0,1808°	-0,8'	18000	8000	в 2,2 раза
2	0,1638°	0,1808°	-1'			

Результаты обработки измерений УНАП существующим методом юстировки путем усреднение массивов измерений на интервале 5 ч (температура измерения углов пространственной ориентации 1 Гц) приведены в столбце 2 таблицы 5.2, а значения углов пространственной ориентации, полученные разработанным методом показаны столбце 3 таблицы 5.2.

Как видно из представленных результатов, необходимый интервал времени наблюдения результатов измерений УНАП при начальной юстировке на объекте эксплуатации разработанным методом в 2 раза меньше, чем при юстировке существующим методом. Разработанный метод позволяет сократить интервал и количество измерений УНАП при обеспечении требуемого значения погрешности начальной юстировки для УНАП (не более 2' для данного типа УНАП).

5.5 Выводы

1. Разработан метод начальной юстировки УНАП на объектах размещения, основанный на определении значений углов пространственной ориентации объекта установки УНАП средствами измерений геометрических величин и применении метода проверки однородности средних.

2. Метод позволяет в 2 и более раз сократить необходимое время на юстировку УНАП на объекте размещения за счет сокращения необходимого количества измерений УНАП и времени на их проведение).

3. Для разработанного метода юстировки определены условия успешной реализации: отсутствие вертикальных отражающих поверхностей в месте проведения работ по начальной юстировке УНАП или антенны УНАП должны быть расположены не ближе 1500 м от отражающих поверхностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена совершенствованию методов измерения углов пространственной ориентации угломерной навигационной аппаратурой потребителя ГЛОНАСС. В диссертации получены следующие основные результаты:

1. Разработана расширенная модель погрешности формирования разности фаз несущих частот навигационных сигналов имитатором сигналов ГНСС на РЧ-выходах. Использование модели позволяет предъявить требования к составляющим погрешности формирования разности фаз имитатором сигналов ГНСС и определить минимальную длину антенной базы, которую возможно сформировать в сценарии имитации для каждого типа УНАП.

2. Разработан метод калибровки имитаторов навигационных сигналов ГЛОНАСС (ГНСС) в части систематической погрешности формирования разности фаз несущих частот навигационных сигналов. Достигнутая расширенная неопределенность калибровки имитаторов при коэффициенте охвата 3 в части систематической погрешности формирования разности фаз несущих частот навигационных сигналов не превышает 1° . Это позволяет применять имитатор сигналов ГНСС в качестве рабочего эталона для координатно-временных средств измерений, в том числе для поверки УНАП.

3. Проведена верификация разработанного метода измерения разности фаз несущих частот навигационных сигналов, формируемых имитатором, и подтверждена сходимость результатов с Государственным вторичным эталоном единиц комплексных коэффициентов передачи.

4. Разработан метод передачи единицы плоского угла от рабочего эталона единицы плоского угла (тахеометра) к составной части рабочего эталона координат местоположения первого разряда. Метод также может быть использован для передачи единицы плоского угла УНАП без

демонтажа её с объектов в полевых условиях. Достигнута расширенная неопределенность при коэффициенте охвата 2 определения значений углов курса, крена и тангажа $0,35'$.

4. Разработан метод оперативной начальной юстировки УНАП на объектах размещения. Установлено, что применение критерия проверки однородности средних обеспечивает уменьшение в 2 и более раз интервала времени накопления измерений УНАП при начальной юстировке.

5. Разработанный метод начальной юстировки отличается универсальностью применения. Он применим для объектов установки УНАП любых габаритных размеров, а также для угломерных антенных систем любой конструкции и количества антенн в системе.

Таким образом, цель диссертационной работы, сформулированная как повышение точности и оперативности измерений углов курса, крена, тангажа угломерной навигационной аппаратурой потребителя ГЛОНАСС, достигнута.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

АЦП	- аналого-цифровой преобразователь
ГЭТ	- Государственный эталон
ГНСС	- глобальная навигационная спутниковая система
ГПС	- Государственная поверочная схема
ИНС	- инерциальная навигационная система
НАП	- навигационная аппаратура потребителя
НКА	- навигационный космический аппарат
НСП	- неисключенная систематическая погрешность
ОКР	- опытно-конструкторская работа
РЧ	- радиочастотный
РЭ	- рабочий эталон
СКО	- среднее квадратическое отклонение
УНАП	- угломерная навигационная аппаратура потребителя
ЦАП	- цифро-аналоговый преобразователь
ADOP	- Attitude Dilution of Precision – геометрический фактор пространственной ориентации

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения.
2. Б.С. Алешин, Д.А. Антонов, К.К. Веремеенко, М.В. Жарков. Сильносвязанная многоантенная интегрированная инерциально-спутниковая навигационная система // Электронный журнал «Труды МАИ» – выпуск № 54 – 14 с.
3. В.А. Борсоев, А.В. Гребенников, А.С. Десятов. Комплексирование угломерной спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС/GPS с ИНС на воздушных судах // Научный вестник МГТУ ГА. Серия радиофизика и радиотехника – 2009 - № 139, с. 91-95.
4. Алешечкин А.М. Аналитический метод расчета погрешностей определения угловой ориентации по сигналам спутниковых радионавигационных систем // Цифровая обработка сигналов. – 2009. – № 2. – с. 17 – 21.
5. Гребенников А.В., Фатеев Ю.Л. Угломерная аппаратура ГЛОНАСС/GPS – особенности разработки, производства и испытаний // сб. докладов II научно-технической конференции «Радионавигационные технологии в приборостроении». Туапсе. 2011.
6. Степанов О.А. Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации // Гироскопия и навигация. – 2002. - № 1 (36). – с. 23 – 45.
7. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В. С. Шебшаевич, П.П. Дмитриев, Н.В. Иванцевич и др.; Под ред. В.С. Шебшаевича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.
8. Постановление Правительства Российской Федерации от 25 августа 2008 г. N 641 «Об оснащении транспортных, технических средств и систем аппаратурой спутниковой навигации ГЛОНАСС или ГЛОНАСС/GPS» (в

редакции постановлений Правительства Российской Федерации от 17.12.2010 г. N 1045; от 12.11.2016 г. N 1156).

9. Тактико-техническое задание на опытно-конструкторскую работу «Создание навигационной аппаратуры с функцией определения пространственной ориентации», шифр «Орт».

10. Аппаратура МРК-101. Режим доступа: <https://krtz.su/node/256> (дата обращения 28.09.2022).

11. ГОСТ Р 54118-2010. ГНСС. Радионавигационные комплексы определения пространственной ориентации потребителей на водном транспорте. Технические характеристики, методы и требуемые результаты испытаний.

12. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29.12.2018 г № 2381 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для координатно-временных измерений».

13. Емельянцев Г.И., Блажнов Б.А., Степанов А.П. Об использовании фазовых измерений для задачи ориентации в интегрированной инерциально-спутниковой системе // Гироскопия и навигация – 2010. - № 1 (68). – с. 26-35.

14. Емельянцев Г.И., Блажнов Б.А., Радченков Д.А., Медведков А.А. О формировании автономного режима работы GPS-компас при длительном пропадании сигнала – 2012 - № 3 (78). – с. 36-44.

15. Перов А.И., Шатилов А.Ю. Оценивание углов ориентации объекта с использованием спутниковых радионавигационных систем// Радиотехнические тетради – 2008 - № 37, с. 53-56.

16. Перов А.И., Корогодин И.В. Оптимальное оценивание угла прихода сигнала с неизвестной начальной фазой двумя разнесенными приемниками // Радиотехнические тетради, № 37, 2008, с. 57-61.

17. Перов А.И., Корогодин И.В. Комбинированная когерентно-некогерентная система определения углов ориентации объекта по сигналам

спутниковых радионавигационных систем // Радиотехника, 2009, № 7, с. 33-40.

18. Sushkin I.N., Thudonogov D. Yu. Control and test bench of goniometric satellite navigation receiver – 2016 – SIBCON.

19. Brown, Alison, Matthews, Tony, Varty, Tom. Low Cost Testing of a High Accuracy INS Using GPS. Proceedings of the National Technical Meeting of The Institute of Navigation, Long Beach, CA, January 1986, pp. 47-48.

20. G. Lachapelle, M. Cannon, G. Lu. Shipborne GPS Attitude Determination During MMST-93. IEEE Journal of oceanic engineering. January 1996, pp. 100-106.

21. C. Wang, G. Lachapelle. GPS Attitude Determination Reliability Performance Improvement Using Low Cost Receivers. Journal of Global Positioning Systems, 2002, pp. 85-95.

22. Определение угловой ориентации объектов по сигналам спутниковых радионавигационных систем: монография / А.М. Алешечкин. – М. : ИНФРА-М; Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. – 175 с.

23. Фатеев Ю.Л. Определение угловой ориентации объектов на основе глобальных навигационных спутниковых систем. Радиотехника, №7, 2002 г.

24. S. Yoon; J.B. Lundberg. Euler angle dilution of precision in GPS attitude determination. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (Volume: 37, Issue: 3, July 2001).

25. В.Е. Вовасов, С.А. Герко. Исследование алгоритмов ориентации высокодинамичных объектов с использованием имитаторов СРНС // Электронный журнал «Труды МАИ» — выпуск № 53.

26. Установка измерительная – имитатор сигналов прецизионный многофункциональный К2-99. ТДЦК.464938.020.

27. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Аттестованные методики (методы измерений) (Электронный ресурс). URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/16/items/276233> (дата обращения 3.10.2022).

28. Опорно-поворотное устройство стенда настройки СН-МРК11 УЭ4.024.061. Технические условия. УЭ26.517.020ТУ.

29. Ю.М. Инчагов, А.Ю. Шатилов, И.А. Нагин. Методика оценивания погрешностей инерциально-спутниковых навигационных систем // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2015. - вып. 11, ч. 2. – с. 197 – 208.

30. Комплект выносной аппаратуры топопривязчика Патент. Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2480714> (дата обращения 01.09.2022).

31. Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Морев И.В., Скрипников С.Ф., Хмелевская М.И., Буравлев А.С., Кострицкий С.М., Федоров И.В., Зуев А.И., Варнаков В.К. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы на основе волоконнооптических гироскопов // Гироскопия и навигация – 2014. - № 1. – с. 14-25.

32. Пудловский В.Б., Слюсарев В.В. Контроль точностных характеристик угломерной навигационной аппаратуры потребителей в составе наземных объектов ВВТ. // сб. докладов V научно-технической конференции «Радиооптические технологии в приборостроении». Туапсе. 2007.

33. Угломерная аппаратура МРК-32. Руководство по эксплуатации. УЭ2.517.020РЭ.

34. Аппаратура МРК-101. Руководство по эксплуатации. УЭ2.517.020-20РЭ.

35. Аппаратура навигационная потребителей глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS «Бриз-КМ» - радионавигационный комплекс морского применения (индекс 14Ц854). Руководство по эксплуатации. Книга 1. ТДЦК.461513.071 РЭ.

36. Навигационная аппаратура потребителей с угломерным каналом «НАП-УК» ЦДКТ.464315.013РЭ.

37. Инженерная записка по выполнению ОКР «Создание навигационной аппаратуры с функцией определения пространственной ориентации».

38. Montenbruck Oliver, Steigenberger Peter, Hauschild Andre. Multi-GNSS signal-in-space range error assessment – Methodology and results // Advances in Space Research. 2018. jun. Т. 61, № 12. С. 3020–3038.

39. ГОСТ 8.381-2009 ГСИ. Эталоны. Способы выражения точности.

40. 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».

41. Д. Дамдинова, А. Полетаев, А. Ченский. Сравнение точности методов вычисления разности фаз квазигармонический сигналов // Вестник СибГУТИ. – 2016. – вып. 2 – с. 87-97.

42. Печерица Д.С. Метод калибровки навигационной аппаратуры потребителей ГЛОНАСС с использованием эталонов, прослеживаемых к государственным первичным эталонам единиц величин: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.15 / Печерица Дмитрий Станиславович. - Менделеево, 2018. - 123 с.

43. ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения».

44. Государственный вторичный эталон 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). Паспорт.

45. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Утвержденные типы средств измерений (Электронный ресурс). URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/378245> (дата обращения 01.10.2022).

46. Приказ Росстандарта от 29.04.2019 г № 1018 «О внесении изменений в приложение к приказу Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26.11.2018 № 2482 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений плоского угла».

47. Leica Geosystems. Product Information/Prism dimensions (Электронный ресурс). Режим доступа: <https://leica-geosystems.com> (дата обращения 18.08.2022).

48. И. Чернов. Методика применения аппаратуры потребителей космических навигационных систем для автономного определения азимутов с требуемой точностью // Информация и космос. – 2017. – вып. 2 – с. 88-94.

49. А.Ю. Махаев, А.С. Бамбиза. Анализ условий высокоточного азимутального ориентирования спутниковой геодезической аппаратурой // Известия Института инженерной физики. - 2017. - вып. 1 (43) – с. 15 – 19.

50. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Утвержденные типы средств измерений (Электронный ресурс). URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/375877> (дата обращения 21.03.2022).

51. Gyromat 5000. Руководство пользователя.

52. Современные методы и средства измерения гравитационного поля Земли / под редакцией В.Г. Пешехонова и О.А. Степанова. СПб: ГНЦ РФ «АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 с.

53. A. Pasetti, L. Giulicchi «Experimental Results on Three Multipath Compensation Techniques for GPS-based Attitude Determination» - 21st Annual AAS Guidance and Control Conference, 1999].

54. Parameter Estimation for Multipath Error in GPS Dual Frequency Carrier Phase Measurements Using Unscented Kalman Filter. International journal of control, automation and systems, vol. 5, no. 4, pp. 388-396, 2007.

55. Jayanta Kumar Ray «Mitigation of GPS Code and Carrier Phase Effects Using a Multy-Antenna System» - The University of Calgary, 2000.

56. Интерфейсный контрольный документ «ГЛОНАСС», редакция 5.1 от 2008 г.

57. Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко. Об устойчивости и мощности критериев проверки однородности средних // Измерительная техника – 2008, № 9, с. 23-28.

58. Фадеева Л. Н., Лебедев А. В., Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Эксмо, 2010. - 496 с. – (Новое экономическое образование).

59. Тюрин Ю. Н., Макаров А.А., Анализ данных на компьютере: учебное пособие. - 4-е изд., перераб. - М.: ИД Форум, 2008. – 368 с., ил. - (Высшее образование).

60. Ивановский Р. Теория вероятностей и математическая статистика. Основы, прикладные аспекты с примерами и задачами в среде Mathcad. — 528 с. — (Учебное пособие). — ISBN 978-5-9775-0199-6.

61. Рекомендация МСЭ-R P.525-2. Расчет ослабления в свободном пространстве.

62. В. Hannah «Modelling and simulation of GPS multipath propagation» - Queensland Institute of Technology, 2001

63. А. С. Воронов. Измерение разности фаз сигналов // Горизонты образования. – 2007. – вып. 9.

64. С.С. Красненко, Д.А. Недорезов, В.Б. Кашкин, Ю.Г. Хазагаров, А.В. Пичкалев. Многоканальный цифровой синтез в имитаторах радионавигационных сигналов // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2013. – вып. 5 – с. 521-526.

65. 37. Навигационный модуль «НМ-1» для комплекса ПНГК-1. Руководство по эксплуатации. ГЕКН 401233.001 РЭ1.

66. С. Чаттарадж, А. Мукхерджи, С. Чаудхури. Задача взаимной установки: алгоритмы и разработка // Гироскопия и навигация. – 2013. - № 3 (82). – с. 33 – 58.

67. Л.П. Несенюк, Л.П. Старосельцев, Г.А. Парр, В.И. Кокорин, Ю.Л. Фатеев, С.П. Баринов, С.М. Бублик, А.А. Шашков. Интегрированная инерциальная/спутниковая система ориентации и навигации с разнесенными приемными антеннами // Гироскопия и навигация. – 2000. - № 4 (31). – с. 41 – 48.

68. Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Морев И.В., Скрипников С.Ф., Хмелевская М.И., Буравлев А.С., Кострицкий С.М., Федоров И.В., Зуев А.И., Варнаков В.К. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы на основе волоконнооптических гироскопов // Гироскопия и навигация – 2014. - № 1. – с. 14-25.

69. Использование спутниковых навигационных систем на кораблях и судах морского флота / В.С. Макода, В.И. Резниченко / Монография – СПб.: ГНИИНГИ, 94 с. - 1999 г.

70. Способ определения углового положения летательного аппарата по данным приемников спутниковой навигационной системы. Патент. Режим доступа: <http://bd.patent.su/2388000-2388999/pat/serv1/servletf48d.html> (дата обращения 20.03.2020).

71. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов /О.Н. Анучин, Г.И. Емельянцев/ Под общей редакцией академика РАН В.Г. Пешехонова. Изд. 2-е, переработанное и дополненное.- СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2003. – 390 с.

72. Е.А. Микрин, М.В. Михайлов, С.Н. Рожков, А.С. Семенов. Результаты летного эксперимента на МКС по исследованию влияния переотражений на решение задач навигации, ориентации и сближения по измерениям аппаратуры спутниковой навигации // Гироскопия и навигация – 2012. - № 1(76). – с. 42-56.

73. Судовой комбинированный приемоиндикатор ГНСС ГЛОНАСС и GPS с дополнительной функцией определения углов пространственной

ориентации «Фарватер РК-2106» (Электронный ресурс). Режим доступа: <http://www.radiocomplex.ru/catalog/88/136.html> (дата обращения 5.10.2022 г.).

74. NT1065_USB3. Board description (Электронный ресурс). Режим доступа: http://ntlab.com/IP/NT1065/NT1065_USB3_description_v1.11.pdf (дата обращения 5.10.2022 г.).

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," 2020 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. 1889 042015. 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 военная 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Дана функция

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

Необходимо найти частные производные:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial R_1}, \frac{\partial \alpha}{\partial R_2}, \frac{\partial \alpha}{\partial \Gamma_1}, \frac{\partial \alpha}{\partial \Gamma_2}, \frac{\partial \alpha}{\partial (A_1 - A_2)}.$$

1) Производная $\frac{\partial \alpha}{\partial R_1}$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial R_1} = \left[\arcsin \left(\frac{R_1 \cdot \cos \Gamma_1}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}} \cdot \sin(A_1 - A_2) \right) \right]_{R_1}'$$

Продифференцируем функцию по правилу нахождения производной сложной функции. Производная функции $\arcsin x = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha}{\partial R_1} &= \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \cdot \cos(\Gamma_1)}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin(\Gamma_2) - R_1 \sin(\Gamma_1))^2}} \cdot \sin(A_1 - A_2) \right)^2}} \cdot \left(\frac{R_1 \cdot \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2)}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}} \right)'_{R_1} = \\ &= \frac{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2 - R_1^2 \cdot \cos^2 \Gamma_1 \sin^2(A_1 - A_2)}} \cdot \\ &\quad \cdot \left(\frac{(R_1 \cdot \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2))'_{R_1} \cdot (\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2})}{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{(\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2})'_{R_1} \cdot (R_1 \cdot \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2))}{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2} \right) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2 - R_1^2 \cdot \cos^2 \Gamma_1 \sin^2(A_1 - A_2)}} \cdot \\
&\quad \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2) \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2} - R_1 \cdot \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2) \frac{(L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2)'_{R_1}}{2\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}} \\
&\quad \cdot \frac{1}{(L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2)} \\
&= \\
&\quad \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2) \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2} - R_1 \cdot \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2) \frac{(-2)(-\sin \Gamma_1)(R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)}{2\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}} \\
&= \frac{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2} - R_1 \cdot \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2) \cdot \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2 - R_1^2 \cdot \cos^2 \Gamma_1 \sin^2(A_1 - A_2)} \cdot \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}} \\
&= \frac{\cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2) (L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2) - R_1 \cdot \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2) \sin \Gamma_1 (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)}{(L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2) \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2 - R_1^2 \cdot \cos^2 \Gamma_1 \sin^2(A_1 - A_2)}}
\end{aligned}$$

Введем обозначение $L_r = \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}$, тогда

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \alpha}{\partial R_1} &= \frac{\cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2) (L_r^2 - R_1 \cdot \sin \Gamma_1 (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1))}{L_r^2 \sqrt{L_r^2 (1 - (\frac{R_1 \cdot \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2)}{L_r})^2)}} = \\
&= \frac{\cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2) L_r^2 \left(1 - \frac{R_1}{L_r^2} \cdot \sin \Gamma_1 (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)\right)}{L_r^3 \sqrt{1 - (\frac{R_1 \cdot \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2)}{L_r})^2}} = \\
&= \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{R_1 \cos \Gamma_1}{L_r} \sin(A_1 - A_2))^2}} \cdot \frac{\cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2)}{L_r} \left(1 - \frac{R_1}{L_r^2} \sin \Gamma_1 (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)\right)
\end{aligned}$$

2) Производная $\frac{\partial \alpha}{\partial R_2}$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial R_2} = \left[\arcsin \left(\frac{R_1 \cdot \cos \Gamma_1}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}} \cdot \sin(A_1 - A_2) \right) \right]_{R_2}'$$

Продифференцируем функцию по правилу нахождения производной сложной функции. Производная функции $\arcsin x = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$.

$$\begin{aligned}\frac{\partial \alpha}{\partial R_2} &= \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \cdot \cos \Gamma_1}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}} \cdot \sin(A_1 - A_2) \right)^2}} \cdot \left(\frac{R_1 \cdot \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2)}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}} \right)'_{R_2} = \\ &= \frac{R_1 \cdot \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2) \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2 - R_1^2 \cdot \cos^2 \Gamma_1 \sin^2(A_1 - A_2)}} \cdot \left(-\frac{(L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2)'_{R_2}}{2(L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2)^{\frac{3}{2}}} \right) = \\ &= -\frac{R_1 \cdot \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2) (-2)(R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)(R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)'_{R_2}}{2(L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2) \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2 - R_1^2 \cdot \cos^2 \Gamma_1 \sin^2(A_1 - A_2)}} = \\ &= \frac{R_1 \cdot \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2) (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1) \sin \Gamma_2}{(L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2) \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2 - R_1^2 \cdot \cos^2 \Gamma_1 \sin^2(A_1 - A_2)}} =\end{aligned}$$

Так как $L_r = \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}$ и

$$\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2 - R_1^2 \cdot \cos^2 \Gamma_1 \sin^2(A_1 - A_2)} = L_r \sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \cdot \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2)}{L_r} \right)^2}, \text{ то}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial R_2} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2)}{L_r} \right)^2}} \cdot \frac{R_1 \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2)}{L_r^3} (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1) \sin \Gamma_2$$

3) Производная $\frac{\partial \alpha}{\partial \Gamma_1}$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \Gamma_1} = \left[\arcsin \left(\frac{R_1 \cdot \cos \Gamma_1}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}} \cdot \sin(A_1 - A_2) \right) \right]'_{\Gamma_1}$$

Продифференцируем функцию по правилу нахождения производной сложной функции. Производная функции $\arcsin x = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \Gamma_1} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \cdot \cos \Gamma_1}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}} \cdot \sin(A_1 - A_2) \right)^2}} \cdot \left(\frac{R_1 \cdot \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2)}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}} \right)'_{\Gamma_1} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{R_1 \sin(A_1 - A_2) \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2 - R_1^2 \cdot \cos^2 \Gamma_1 \sin^2(A_1 - A_2)}} \cdot \\
&\quad \cdot \left(\frac{(\cos \Gamma_1)'_{\Gamma_1} \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2} - \cos(\Gamma_1) \cdot \left(\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2} \right)'_{\Gamma_1}}{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2} \right) = \\
&= R_1 \sin(A_1 - A_2) \cdot \left(\frac{-\sin \Gamma_1 \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2} - \cos(\Gamma_1) \cdot \frac{(L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2)'_{\Gamma_1}}{2\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}}}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2 - R_1^2 \cdot \cos^2 \Gamma_1 \sin^2(A_1 - A_2)} \cdot \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}} \right) \\
&= R_1 \sin(A_1 - A_2) \cdot \\
&\quad \cdot \left(\frac{-\sin(\Gamma_1) \cdot \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2} - \cos(\Gamma_1) \cdot \frac{(-2)(R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1) \cdot (-R_1 \sin \Gamma_1)'_{\Gamma_1}}{2\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}}}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2 - R_1^2 \cdot \cos^2 \Gamma_1 \sin^2(A_1 - A_2)} \cdot \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}} \right) = \\
&= R_1 \sin(A_1 - A_2) \cdot \left(\frac{-\sin \Gamma_1 \cdot (L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2) - R_1 \cos^2 \Gamma_1 (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2 - R_1^2 \cdot \cos^2 \Gamma_1 \sin^2(A_1 - A_2)} \cdot (L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2)} \right)
\end{aligned}$$

Так как $L_r = \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}$ и

$$\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2 - R_1^2 \cdot \cos^2 \Gamma_1 \sin^2(A_1 - A_2)} = L_r \sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \cdot \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2)}{L_r} \right)^2}, \text{ то}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \Gamma_1} = - \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \cos \Gamma_1}{L_r} \sin(A_1 - A_2) \right)^2}} \cdot \frac{R_1 \sin(A_1 - A_2)}{L_r^3} (L_r^2 \sin \Gamma_1 + R_1 \cos^2 \Gamma_1 \cdot (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1))$$

4) Производная $\frac{\partial \alpha}{\partial \Gamma_2}$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \Gamma_2} = \left[\arcsin \left(\frac{R_1 \cdot \cos \Gamma_1}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}} \cdot \sin(A_1 - A_2) \right) \right]_{\Gamma_2}'$$

Продифференцируем функцию по правилу нахождения производной сложной функции. Производная функции $\arcsin x = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \alpha}{\partial \Gamma_2} &= \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \cdot \cos(\Gamma_1)}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin(\Gamma_2) - R_1 \sin(\Gamma_1))^2}} \cdot \sin(A_1 - A_2) \right)^2}} \cdot \left(\frac{R_1 \cdot \cos(\Gamma_1) \sin(A_1 - A_2)}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin(\Gamma_2) - R_1 \sin(\Gamma_1))^2}} \right)'_{\Gamma_2} = \\
&= \frac{R_1 \cdot \cos(\Gamma_1) \sin(A_1 - A_2) \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2 - R_1^2 \cdot \cos^2 \Gamma_1 \sin^2(A_1 - A_2)}} \cdot \left(\frac{(L^2 - (R_2 \sin(\Gamma_2) - R_1 \sin(\Gamma_1))^2)'_{\Gamma_2}}{2(L^2 - (R_2 \sin(\Gamma_2) - R_1 \sin(\Gamma_1))^2)^{\frac{3}{2}}} \right) = \\
&= \frac{R_1 \cdot \cos(\Gamma_1) \sin(A_1 - A_2) \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2 - R_1^2 \cdot \cos^2 \Gamma_1 \sin^2(A_1 - A_2)}} \cdot \\
&\quad \cdot \left(\frac{(-2)(R_2 \sin(\Gamma_2) - R_1 \sin(\Gamma_1)) (R_2 \sin(\Gamma_2) - R_1 \sin(\Gamma_1))'_{\Gamma_2}}{2(L^2 - (R_2 \sin(\Gamma_2) - R_1 \sin(\Gamma_1))^2)} \right) = \\
&= \frac{R_1 \cdot \cos(\Gamma_1) \sin(A_1 - A_2) R_2 \cos(\Gamma_2) (R_2 \sin(\Gamma_2) - R_1 \sin(\Gamma_1))}{(L^2 - (R_2 \sin(\Gamma_2) - R_1 \sin(\Gamma_1))^2) \cdot \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2 - R_1^2 \cdot \cos^2 \Gamma_1 \sin^2(A_1 - A_2)}}
\end{aligned}$$

Так как $L_r = \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}$ и

$$\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2 - R_1^2 \cdot \cos^2 \Gamma_1 \sin^2(A_1 - A_2)} = L_r \sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \cdot \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2)}{L_r} \right)^2}, \text{ то}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \Gamma_2} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2)}{L_r} \right)^2}} \cdot \frac{R_1 \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2)}{L_r^3} (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1) R_2 \cos \Gamma_2$$

5) Производная $\frac{\partial \alpha}{\partial (A_1 - A_2)}$.

Продифференцируем функцию по правилу нахождения производной сложной функции. Производная функции $\arcsin x = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \alpha}{\partial (A_1 - A_2)} &= \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \cdot \cos(\Gamma_1)}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin(\Gamma_2) - R_1 \sin(\Gamma_1))^2}} \cdot \sin(A_1 - A_2) \right)^2}} \cdot \left(\frac{R_1 \cdot \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2)}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}} \right)'_{(A_1 - A_2)} \\
&=
\end{aligned}$$

$$= \frac{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2 - R_1^2 \cdot \cos^2 \Gamma_1 \sin^2(A_1 - A_2)}} \cdot \frac{R_1 \cdot \cos \Gamma_1}{\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}} \cdot \cos(A_1 - A_2)$$

Так как $L_r = \sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2}$ и

$$\sqrt{L^2 - (R_2 \sin \Gamma_2 - R_1 \sin \Gamma_1)^2 - R_1^2 \cdot \cos^2 \Gamma_1 \sin^2(A_1 - A_2)} = L_r \sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \cdot \cos \Gamma_1 \sin(A_1 - A_2)}{L_r}\right)^2}, \text{ то}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial(A_1 - A_2)} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_1 \cos \Gamma_1}{L_r} \sin(A_1 - A_2)\right)^2}} \cdot \frac{R_1 \cos \Gamma_1}{L_r} \cos(A_1 - A_2)$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

$$(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}} = \arcsin\left(2 \cdot \frac{\overline{S_1 \cdot S_2}}{A_1 \cdot A_2}\right), \quad (\text{Б.1})$$

где $\overline{S_1[k] \cdot S_2[k]}$ - среднее значение поэлементного усреднения массивов $S_1[k]$ и $S_2[k]$ выборок сигналов;

A_1, A_2 – амплитуды сигналов S_1 и S_2 , В.

Входящее в выражение (Б.1) усредненное произведение сигналов можно представить следующим образом:

$$\overline{S_1 \cdot S_2} = \frac{S_1[1] \cdot S_2[1] + S_1[2] \cdot S_2[2] + \dots + S_1[k] \cdot S_2[k]}{k}, \quad (\text{Б.2})$$

где k – количество дискретов осциллографа.

Тогда выражение (Б.1) можно преобразовать к следующему виду:

$$(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}} = \arcsin\left(2 \cdot \frac{S_1[1] \cdot S_2[1] + S_1[2] \cdot S_2[2] + \dots + S_1[k] \cdot S_2[k]}{k \cdot A_1 \cdot A_2}\right) \quad (\text{Б.3})$$

Для (Б.3) найдем частные производные по каждой измеряемой величине:

$$\frac{\partial(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}}}{\partial A_1} = \frac{2}{\sqrt{1 - \left(2 \cdot \frac{\overline{S_1 \cdot S_2}}{A_1 \cdot A_2}\right)^2}} \cdot \frac{\overline{S_1 \cdot S_2}}{A_2} \cdot \left(-\frac{1}{A_1^2}\right) \quad (\text{Б.4})$$

$$\frac{\partial(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}}}{\partial A_2} = \frac{2}{\sqrt{1 - \left(2 \cdot \frac{\overline{S_1 \cdot S_2}}{A_1 \cdot A_2}\right)^2}} \cdot \frac{\overline{S_1 \cdot S_2}}{A_1} \cdot \left(-\frac{1}{A_2^2}\right) \quad (\text{Б.5})$$

$$\frac{\partial(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}}}{\partial(S_1[k])} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(2 \cdot \frac{\overline{S_1 \cdot S_2}}{A_1 \cdot A_2}\right)^2}} \cdot \frac{2}{k \cdot A_1 \cdot A_2} \cdot S_2[k] \quad (\text{Б.6})$$

$$\frac{\partial(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}}}{\partial(S_2[k])} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(2 \cdot \frac{\overline{S_1 \cdot S_2}}{A_1 \cdot A_2}\right)^2}} \cdot \frac{2}{k \cdot A_1 \cdot A_2} \cdot S_1[k] \quad (\text{Б.7})$$

Формулы частных производных (Б.4 – Б.7) справедливы для любого порядкового k.

В процессе измерения разности фаз сигнала одного НКА с двух РЧ-выходов необходимо учитывать корреляцию параметров воспроизводимых сигналов. Для исследуемых выборок коэффициент корреляции был определен экспериментально и имеет следующий вид [39]:

$$r(S_1, S_2) = \frac{\sum_k (S_1[k] - \bar{S}_1)(S_2[k] - \bar{S}_2)}{\sqrt{\sum_k (S_1[k] - \bar{S}_1)^2 \cdot \sum_k (S_2[k] - \bar{S}_2)^2}} = 0,8 \quad (\text{Б.8})$$

В соответствии с [43]:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) \quad (\text{Б.9})$$

Так как стандартная неопределенность измерения каждого дискрета ($S_{1,2}[k]$) каналами осциллографа равна стандартной неопределенности единичного измерения амплитуды сигналов осциллографом (неопределенности измерения амплитуд в каналах осциллографа будем считать одинаковыми), то $u(S_{1,2}[k]) = u(A_{1,2})$.

Тогда можно записать следующие выражения:

$$\begin{aligned} & \sum_k \left(\frac{\partial(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}}}{\partial(S_1[k])} \right)^2 \cdot u^2(S_1[k]) + \sum_k \left(\frac{\partial(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}}}{\partial(S_2[k])} \right)^2 \cdot u^2(S_2[k]) = \\ & = \sum_k \left(\frac{\partial(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}}}{\partial(S_1[k])} \right)^2 \cdot u^2(A_1) + \sum_k \left(\frac{\partial(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}}}{\partial(S_2[k])} \right)^2 \cdot u^2(A_2) = \\ & = \left(\left(\frac{2 \cdot \bar{S}_1}{A_1 \cdot A_2} \right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \bar{S}_2}{A_1 \cdot A_2} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(2 \cdot \frac{\bar{S}_1 \cdot \bar{S}_2}{A_1 \cdot A_2} \right)^2}} \right)^2 \cdot u^2(A) \end{aligned} \quad (\text{Б.10})$$

$$\sum_k \sum_k \frac{\partial(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}}}{\partial(S_1[k])} \cdot \frac{\partial(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}}}{\partial(S_2[k])} \cdot u(S_1[k]) \cdot u(S_2[k]) \cdot r(S_1, S_2) =$$

$$= \left(\frac{2}{A_1 \cdot A_2 \sqrt{1 - \left(2 \cdot \frac{\overline{S_1 \cdot S_2}}{A_1 \cdot A_2} \right)^2}} \right)^2 \cdot \frac{\overline{S_1 \cdot S_2}}{k} \cdot u^2(A) \cdot r(S_1, S_2) \quad (\text{Б.11})$$

Проведем анализ (Б.4 – Б.7, Б.10, Б.11). Здесь члены выражения вида $\left| 2 \cdot \frac{\overline{S_1 \cdot S_2}}{A_1 \cdot A_2} \right| \in [0; 1)$, т.е. не превышают по величине 1 на интервале усреднения. С ростом интервала усреднения на большом количестве периодов несущей частоты (более 200 периодов при практической реализации метода) член выражения $\overline{S_1 \cdot S_2} \ll (A_1 \cdot A_2)$.

Отсюда для упрощения дальнейших вычислений примем как значение середины интервала возможных значений:

$$\frac{\overline{S_1 \cdot S_2}}{A_1 \cdot A_2} = \frac{1}{4}. \quad (\text{Б.12})$$

Тогда с учетом (Б.12) можно записать:

$$\left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(2 \cdot \frac{\overline{S_1 \cdot S_2}}{A_1 \cdot A_2} \right)^2}} \right)^2 = \frac{4}{3}; \quad \left(2 \cdot \frac{\overline{S_1 \cdot S_2}}{A_1^2 \cdot A_2} \right) = \frac{1}{2 \cdot A_1}, \quad \left(2 \cdot \frac{\overline{S_1 \cdot S_2}}{A_1 \cdot A_2^2} \right) = \frac{1}{2 \cdot A_2},$$

$$\frac{\overline{S_1 \cdot S_2}}{k \cdot (A_1 \cdot A_2)^2} = \frac{1}{4 \cdot k \cdot A_1 \cdot A_2}.$$

Для рассматриваемого случая, количество k дискретов осциллографа много больше периода несущей частоты навигационного сигнала (более 200 периодов при практической реализации метода), поэтому можно принять:

$$\overline{S_1} < \frac{1}{2} \cdot A_1, \quad \overline{S_2} < \frac{1}{2} \cdot A_2. \quad (\text{Б.13, Б.14})$$

С учетом (Б.13, Б.14) выражение для суммарной стандартной неопределенности можно записать в следующем виде:

$$u_c^2 =$$

$$\left(\frac{\partial(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}}}{\partial A_1} \right)^2 \cdot u^2(A_1) + \left(\frac{\partial(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}}}{\partial A_2} \right)^2 \cdot u^2(A_2) +$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_k \left(\frac{\partial(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}}}{\partial(S_1[k])} \right)^2 \cdot u^2(S_1[k]) + \sum_k \left(\frac{\partial(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}}}{\partial(S_2[k])} \right)^2 \cdot u^2(S_2[k]) + \\
& + \sum_k \sum_k \frac{\partial(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}}}{\partial(S_1[k])} \cdot \frac{\partial(\varphi - \varphi_0)_{\text{АЦП}}}{\partial(S_2[k])} \cdot u(S_1[k]) \cdot u(S_2[k]) \cdot r(S_1, S_2) = \\
& = \frac{2}{3} \cdot \left[\left(\frac{\sqrt{5}}{A_1} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{5}}{A_2} \right)^2 + \frac{8}{5 \cdot k \cdot A_1 \cdot A_2} \right] \cdot u^2(A)
\end{aligned}$$

Тогда коэффициент чувствительности равен:

$$c = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \left[\left(\frac{\sqrt{5}}{A_1} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{5}}{A_2} \right)^2 + \frac{8}{5 \cdot k \cdot A_1 \cdot A_2} \right]}$$

Для получения значения стандартной неопределенности, выраженной в градусах, выражение этого коэффициента можно представить как:

$$c = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \left[\left(\frac{\sqrt{5}}{A_1} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{5}}{A_2} \right)^2 + \frac{8}{5 \cdot k \cdot A_1 \cdot A_2} \right]}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акты о внедрении результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ФГУП «ВНИИФТРИ»
доктор технических наук, профессор

С.И. Донченко



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Фролова Анатолия Александровича

**«СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ УГЛОМЕРНОЙ
НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРОЙ ПОТРЕБИТЕЛЯ ГЛОНАСС»**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Фролова Анатолия Александровича на тему «Совершенствование методов измерения углов пространственной ориентации угломерной навигационной аппаратурой потребителя ГЛОНАСС» представляют практический интерес и были использованы в ФГУП «ВНИИФТРИ»:

1) при разработке Государственной поверочной схемы для координатно-временных средств измерений (2018 г);

2) при разработке методики поверки Государственного рабочего эталона координат местоположения первого разряда - комплекса эталонного формирования и измерения радионавигационных параметров ЭФИР (2021 г);

3) при создании комплекса метрологического обеспечения навигационной аппаратуры потребителей системы ГЛОНАСС гражданского применения (ОКР «Метрология-2016») (2016 г);

4) при проведении работ по метрологическому обеспечению разработки угломерной навигационной аппаратуры потребителей нового поколения, выполненных в рамках СЧ ОКР «Орт-В» (2017 г);

5) при разработке методик поверки четырех типов угломерной навигационной аппаратуры потребителей: Бриз-КМ-РНК 14Ц854, УНАП-П 14Ц8027, УНАП-О 14Ц8028, УНАП-Б 14Ц8029.

Председатель комиссии

О.В. Денисенко

Члены комиссии

А.М. Каверин

И.С. Сильвестров

Д.С. Печерица

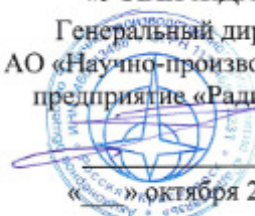


**Акционерное общество
«Научно-производственное предприятие «Радиосвязь»
(АО «НПП «Радиосвязь»)**

ул. Декабристов, д. 19, Красноярск, 660021
Тел. (391) 204-11-02, тел./факс (391) 204-12-38 E-mail: info@krtz.su
ОКПО 44589548, ОГРН 1122468072231, ИНН/КПП 2460243408/246001001

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
АО «Научно-производственное
предприятие «Радиосвязь»



Р.Г. Галеев

« октября 2022 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Фролова Анатолия Александровича

«Совершенствование методов измерения углов пространственной
ориентации угломерной навигационной аппаратуры потребителя ГЛОНАСС»
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение»

Комиссия в составе: председателя – заместителя генерального
директора по научно-техническому развитию Богатырева Евгения
Владимировича; членов комиссии: главного конструктора Казакова Андрея
Анатолевича; главного метролога Рыжкова И.А.

составили настоящий акт о том, что в рамках опытно-конструкторской
работы «Орт» при разработке методических документов по начальной
установке на объектах потребителей, а также периодической проверке
угломерной НАП (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) были использованы
и внедрены следующие результаты диссертационной работы:

1. Метод передачи единицы плоского угла без демонтажа УНАП в
полевых условиях, основанный на использовании рабочего эталона единицы
плоского угла (тахеометра);

2. Метод начальной юстировки УНАП, основанный на применении
критерия проверки однородности средних.

Использование указанных результатов позволило повысить
эффективность использования УНАП в составе объектов размещения.

Председатель комиссии

Е.В. Богатырев

Члены комиссии:

А.А. Казаков

И.А. Рыжков

УТВЕРЖДАЮ

Начальник

ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России



Т.Ф.Мамлеев

2022 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Фролова Анатолия Александровича

**«СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ УГЛОМЕРНОЙ
НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРОЙ ПОТРЕБИТЕЛЯ ГЛОНАСС»**

Настоящим актом подтверждается, что разработанный автором диссертации метод передачи единицы плоского угла без демонтажа угломерной НАП в полевых условиях, основанный на использовании рабочего эталона единицы плоского угла (тахеометра) был использован при разработке:

- 1) нормативного документа на военную поверочную схему для координатно-временных средств измерений;
- 2) нормативного документа на методы и средства поверки навигационной аппаратуры потребителей военного назначения;
- 3) требований к комплексам навигационным метрологическим специального назначения КПА НАП.

Начальник отдела

Серко С.Г.