

На правах рукописи

УДК 629.05



**РЫБАКОВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЯ  
ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ  
С АППАРАТУРОЙ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ  
НАВИГАЦИИ ПО ГРАВИТАЦИОННОМУ ПОЛЮ ЗЕМЛИ**

05.12.14 - Радиолокация и радионавигация

05.11.03 - Приборы навигации

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва — 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

**Научный руководитель:** **Власов Игорь Борисович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектронных систем и устройств ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Научный консультант:** **Фатеев Вячеслав Филиппович**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, начальник научно-технического центра метрологического обеспечения наземной и космической гравиметрии ФГУП «ВНИИФТРИ»

**Официальные оппоненты:** **Почукаев Владимир Николаевич**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник АО «ЦНИИмаш»

**Котов Николай Иванович**, кандидат технических наук, профессор, заместитель начальника управления навигационно-геодезических систем МОУ "Институт инженерной физики"

**Ведущая организация:** АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро»

Защита состоится 21 января 2021 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.141.11 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,  
д.т.н., профессор



И.Б. Власов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Глобальные Навигационные Спутниковые Системы (ГНСС) обеспечивают высокие потенциальные точности навигационных определений, глобальное покрытие и непрерывность навигации. Однако существует ряд ситуаций, в которых уровень принимаемых сигналов ГНСС оказывается ниже порогового уровня, например, в туннелях, каньонах, закрытых помещениях, либо прием сигналов вообще невозможен (под землей, под водой, на других планетах). Кроме того, не теряет актуальности проблема работы в условиях преднамеренных помех, в том числе несанкционированного изменения мощности (вплоть до полного отключения) сигналов космических аппаратов. В качестве примера можно привести ситуацию, когда с 11 по 18 июля 2019 г. ГНСС GALILEO была неработоспособна в связи с ее отключением.

Иными словами, существующие методы и средства навигации на основе спутниковых навигационных систем не гарантирует выполнение требований надежности навигационно-временных определений (НВО) в условиях преднамеренных помех и недоступности сигналов ГНСС. Решение указанной задачи возможно за счет комплексирования спутниковой навигационной аппаратуры потребителя (НАП) с автономными средствами навигации, основанными на иных принципах, в частности, с широко используемыми в настоящее время бесплатформенными инерциальными навигационными системами (БИНС). Основная проблема, связанная с применением БИНС, состоит в необходимости коррекции погрешностей определения местоположения, накапливаемых на протяженных трассах движения. Для решения указанной проблемы может использоваться информация от следующих систем:

- корреляционно-экстремальных навигационных систем (КЭНС) по рельефу Земной поверхности, по радиолокационным, оптическим и радиотепловым изображениям участков местности;
- КЭНС по гравитационному и магнитному полям Земли.

Однако КЭНС по рельефу и оптическим изображениям участков местности неработоспособны над океаном. КЭНС по радиолокационным и радиотепловым изображениям, а также КЭНС по магнитному полю Земли, подвержены влиянию помех. Кроме того, по причине глобального изменения магнитного поля Земли данные системы требуют регулярного обновления карт.

Глобальность, точность и абсолютную помехозащищенность корректирующей информации можно обеспечить за счет измерения составляющих гравитационного поля Земли (ГПЗ), которое в целом стабильно во времени, а его малые вариации достаточно точно прогнозируются. Исходя из этого, в рамках программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2021-2030 годы» в качестве одного из направлений повышения помехозащищенности навигационных определений рассматривается исследование методов и средств комплексирования навигационной аппаратуры потребителя ГНСС с технологией корреляционно-экстремальной навигации по ГПЗ. Кроме того, в рамках этой программы предполагается создание систем навигации

лунных и марсианских экспедиций, в которых навигация с помощью гравитационного поля может стать более дешёвой и устойчивой альтернативой другим методам.

В связи с этим, разработка и исследование комплексированной помехоустойчивой аппаратуры потребителя на основе НАП ГНСС и КЭНС по ГПЗ является важной и актуальной научно-технической задачей.

**Целью** диссертационной работы является создание и исследование комплекса, состоящего из НАП ГНСС, БИНС и КЭНС по гравитационному полю Земли, обеспечивающего навигационные определения в условиях радиопомех и в отсутствие сигналов спутниковых навигационных систем.

Для достижения поставленной в данной диссертационной работе цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать методы повышения оперативности навигации по ГПЗ, в том числе – новые алгоритмы обработки гравитационных измерений.
2. Разработать имитационную модель комплексированной помехоустойчивой навигационной аппаратуры потребителя, включающую корреляционно-экстремальную навигационную систему (КЭНС) по ГПЗ.
3. Исследовать характеристики точности комплексной бортовой системы навигации, основанной на измерениях текущих параметров ГПЗ (значений ускорения свободного падения и гравитационных градиентов).
4. Разработать методы повышения точности измерения разности высот при подготовке навигационных гравиметрических карт на основе измерений разности гравитационных потенциалов вдоль маршрута навигации с использованием высокостабильных стандартов частоты и времени (СЧВ).

Задачи, решаемые в работе, соответствуют паспортам специальности: 05.12.14 (пункты 7 и 9) и 05.11.03 (пункты 2 и 6).

**Научная новизна** результатов, полученных лично автором:

1. Разработан алгоритм определения местоположения, обладающий на порядок меньшими вычислительными затратами при соизмеримой точности навигации по сравнению с алгоритмом, минимизирующим дисперсию ошибки.
2. Создана имитационная модель комплексированной помехоустойчивой навигационной аппаратуры потребителя на основе НАП ГНСС, БИНС и КЭНС, позволяющая определить точность навигации на основе измерения ускорения свободного падения и гравитационных градиентов ГПЗ.
3. При движении в гравитационном поле выбор минимальной протяженности маршрута движения далеко не всегда является оптимальным, поскольку, с точки зрения повышения точности навигации, предпочтителен маршрут, на котором градиент изменяемого параметра ГПЗ максимален.
4. На основе имитационной модели обоснованы требования к погрешности бортовых гравитационных измерителей и погрешности подготовки карт.
5. Применение высокостабильных СЧВ позволяет повысить точность подготовки высотной основы больших территорий для привязки навигационных гравиметрических карт. В процессе работы над диссертацией, при участии ав-

тора впервые в РФ проведен эксперимент по измерению разности гравитационных потенциалов методом релятивистской синхронизации НАП ГНСС и обоснована возможность получения пикосекундной точности синхронизации.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Алгоритм определения местоположения на основе ортогонального разложения измерений и карты, позволяющий сократить вычислительные затраты на порядок по сравнению с алгоритмом, минимизирующим дисперсию ошибки, при сопоставимом уровне точности определения местоположения.
2. Имитационная модель комплексированной навигационной системы в составе НАП ГНСС, БИНС и гравитационной КЭНС, на основе которой обоснованы требования к точности бортовых гравиметров и гравитационных градиентометров, а также к точности навигационных карт.
3. Выбор маршрута движения объекта навигации существенно влияет на точность выхода подвижного объекта в заданную область пространства, поскольку погрешность навигации по ГПЗ зависит от градиента измеряемого поля на маршруте движения.
4. Метод повышения точности высотной основы больших территорий для взаимной привязки навигационных гравиметрических карт за счет измерения разности гравитационных потенциалов в разнесенных точках с помощью высокостабильных стандартов частоты и времени и метода релятивистской синхронизации на основе НАП ГНСС.

**Практическая значимость** диссертации заключается в возможности использования ее результатов при выполнении следующих работ:

1. При разработке перспективных систем навигации на основе комплексирования НАП ГНСС с гравитационными КЭНС;
2. При обосновании требований к точности перспективных бортовых гравитационных измерителей параметров ГПЗ, а также точности карты для различных классов потребителей;
3. При планировании маршрутов движения потребителей различных классов. При этом для повышения точности навигации необходимо выбирать маршрут движения с наиболее аномальными участками;
4. Для повышения точности высотной основы больших территорий с помощью квантового нивелира при подготовке маршрутов навигации по ГПЗ.

#### **Апробация результатов диссертационной работы.**

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях: XXII конференция молодых ученых «Навигация и управление движением» (г. Санкт-Петербург, 2020 г.); II научно-техническая конференция «Навигация по гравитационному и магнитному полям Земли. Новые технологии» (р.п. Меделеево, 2019 г.); IV Всероссийская научно-техническая конференция «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами» (г. Москва, 2019 г.); IV Меведомственный научно-технический семинар «Перспективы развития астрономо-геодезического обеспечения при использовании глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.); IX международный симпозиуме «Метрология времени и

пространства» (р.п. Меделеево, 2018 г.); конференция «Навигация по гравитационному полю земли и ее метрологическое обеспечение» (р.п. Меделеево, 2017 г.); симпозиум Международной ассоциации по геодезии (IAG) «Наземная, морская и аэрогравиметрия: измерения на неподвижных и подвижных основаниях» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.); научно-практической конференции с международным участием «Космонавтика XXI века» (г. Королев, 2016 г.); НТС «Проблемы разработки и внедрения прорывных технологий в интересах создания и применения стратегических ракетных систем» (г. Королев, 2016 г.); международном военно-техническом форуме «АРМИЯ-2016» (г. Кубинка, 2016 г.); научно-практическая конференция молодых учёных, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке» (р.п. Меделеево, 2016 г., 2017 г., 2018 г., 2019 г., 2020 г.).

Результаты исследований использованы при выполнении следующих научно-технических работ:

1. СЧ НИР «Исследования и научно-техническое обоснование использования перспективных технологий в системе ГЛОНАСС в части использования геофизических полей в интересах навигации и метрологического обеспечения перспективных систем» Заказчик: Роскосмос;
2. НИР «Гравиградиентометр». Заказчик: ФГУП «ВНИИФТРИ».
3. ОКР «ГГСК-точность». Заказчик: Росстандарт.

Использование результатов исследований подтверждено актами, полученными во ФГУП «ВНИИФТРИ».

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 30 печатных работ, в том числе 7 статей в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ и/или международные базы цитирования Web of Science и Scopus [1–7], 1 свидетельство о регистрации базы данных [8].

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и библиографии, включающего 193 наименования. Общий объем диссертации составляет 138 страниц, включая 47 рисунков и 11 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность, определены цели и задачи диссертационной работы. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, обозначена научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Представлен перечень мероприятий, на которых проводилась апробация научных результатов.

**В первой главе** представлен обзор текущего состояния разработок корреляционно-экстремальных навигационных систем, которые могут использоваться для комплексирования с навигационной аппаратурой потребителя ГНСС. Рассмотрены их достоинства и недостатки. Показано, что в перспективных системах коррекции БИНС целесообразно использовать гравитационное поле Земли (ГПЗ), как наиболее стабильное и не подверженное влиянию искусственных и естественных помех.

В основе системы коррекции по ГПЗ лежит система навигации, базовым элементом которой является БИНС. Система навигации вычисляет местоположение объекта навигации  $X^{HC}$ , которое можно представить в следующем виде:  $X^{HC} = X^0 + X^{\delta HC}$ , где  $X^0$  – истинное положение объекта навигации;  $X^{\delta HC}$  – ошибка определения местоположения по данным навигационной системы.

Вторым составляющим элементом системы коррекции по ГПЗ является измеритель параметров ГПЗ и соответствующая карта параметров ГПЗ. Процесс измерения можно описать следующим выражением:  $Y^{изм} = f_k(X^0) + Y^{\delta изм}$ , где  $Y^{изм}$  – измеренное значение параметра ГПЗ на выходе измерителя;  $f_k(X^0)$  – значение параметра ГПЗ в точке истинного положения объекта навигации;  $Y^{\delta изм}$  – ошибка измерения, определяемая внутренним устройством датчика и особенностями измерения.

Гравитационное поле характеризуется следующими измеряемыми навигационными параметрами:

- 1) Гравитационный потенциал [ $м^2/с^2$ ] – скалярная величина, характеризующая потенциальную энергию гравитационного поля в точке измерения.
- 2) Ускорение свободного падения (УСП,  $g$ ) [ $1 \text{ Гал} = 0.01 \text{ м/с}^2$ ] – первый градиент гравитационного потенциала.
- 3) Гравитационный градиент [Этвеш =  $10^{-9} \text{ с}^{-2}$ ] – величина, характеризующая градиент ускорения свободного падения.

В процессе движения по маршруту потребитель формирует ожидаемые значения параметра ГПЗ  $Y^k$  по соответствующей карте  $f_k$  в требуемой точке пространства:  $Y^k = f_k(X^{HC}) + Y^{\delta k}$ , где  $Y^{\delta k}$  – ошибка картографирования.

По значениям  $X^{HC}$ ,  $Y^{изм}$  и  $Y^k$  в бортовой вычислительной машине формируется навигационное решение, на основе которого корректируются БИНС. Схема построения комплексированной навигационной аппаратуры на основе НАП ГНСС, БИНС и КЭНС по ГПЗ представлена на Рисунке 1.

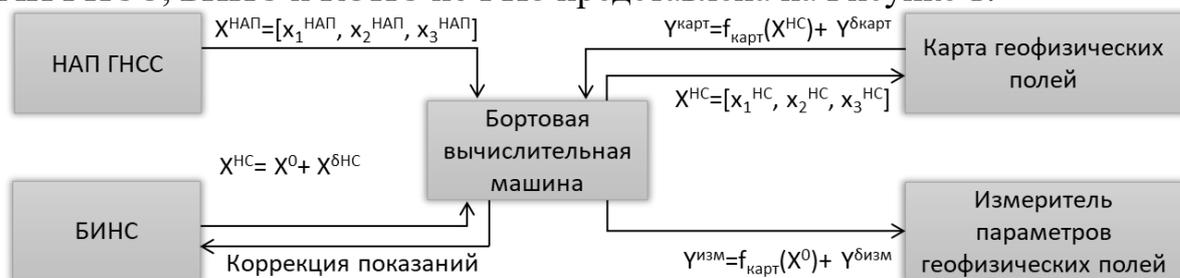


Рисунок 1. Схема построения комплексированной аппаратуры потребителя на основе НАП ГНСС, БИНС и КЭНС по ГПЗ.

Далее в диссертационной работе проведен обзор и анализ основных составляющих данной системы, таких как измерители параметров ГПЗ, карты этих параметров и основные алгоритмы, используемые в КЭНС. На основе проведенного анализа сделаны следующие выводы:

1. Необходима разработка и модернизация поисковых алгоритмов, обладающих точностью, соизмеримой с алгоритмом, минимизирующим дисперсию ошибки, но имеющих существенно меньшие вычислительные затраты;
2. Для исследования точностных характеристик, а также для обоснования требований к составным частям комплексированной помехоустойчивой

аппаратуры при движении по маршрутам с разной неоднородностью ГПЗ необходима разработка имитационной модели такой системы;

3. Необходимо исследование направлений повышения точности высотной основы для взаимной привязки навигационных гравитационных карт на основе измерений разности гравитационных потенциалов и соответствующей разности ортометрических высот вдоль маршрута навигации.

По результатам обзора составных элементов сформулированы основные задачи, которые решаются в следующих главах диссертационной работы.

**Во второй главе** представлено описание модернизированного поискового алгоритма в системах навигации по ГПЗ.

Алгоритмы навигации по ГПЗ разделяются на два типа – беспойсковые и поисковые. Беспойсковые алгоритмы работают на основе теории фильтрации и используются для уточнения местоположения потребителя на маршруте движения. Для первоначального поиска исходной точки навигации используются поисковые алгоритмы. Они работают на основе вычисления Байесовских оптимальных оценок для измеренных значений параметров ГПЗ.

Задача навигации в поисковых алгоритмах формулируется следующим образом:

1) Известна карта  $G^{\text{карт}}$  приращений ускорения свободного падения на маршруте  $L$  в узлах равномерной сетки с шагом  $\Delta L_{\text{grid}}$  (Рисунок 2). Число узлов карты  $N_{\text{grid}}=L/\Delta L_{\text{grid}}+1$ . Значения поля в узлах карты на маршруте  $X^{\text{карт}}_l$  заданы с ошибками  $n^{\text{карт}}_l=n^{\text{карт}}(X^{\text{карт}}_l)$ , представляющими собой центрированный белый шум с СКО  $\sigma_{\text{карт}}$ , т.е.  $G^{\text{карт}} = \{g_0^{\text{карт}}, \dots, g_l^{\text{карт}}, \dots, g_{N_{\text{grid}}}^{\text{карт}}\}$ , где  $g_l^{\text{карт}} = g(X^{\text{карт}}_l) + n^{\text{карт}}_l$ ;  $l=1, \dots, N_{\text{grid}}$ .

2) Объект навигации движется по этому маршруту из исходной точки  $X_0$  с постоянной скоростью  $V$  и производит измерения приращения УСП на борту  $G^{\text{изм}}_l = \{g^{\text{изм}}_1, \dots, g^{\text{изм}}_i, \dots, g^{\text{изм}}_l\}$ . Значения определяются выражением:  $g^{\text{изм}}_i = [g(X_i) + n^{\text{изм}}(t_i) + \Delta g] - g^{\text{изм}}_0$ , где  $g(X_i)$  – истинное значение гравитационного поля в точке с координатой  $X_i = X_0 + V \cdot t_i$ ;  $n^{\text{изм}}(t_i)$  – белый гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и СКО  $\sigma_{\text{изм}}$ ;  $\Delta g$  – систематическая составляющая измерений с дисперсией  $\sigma_d^2$ ;  $g^{\text{изм}}_0 = g(X_0) + n^{\text{изм}}(t_0) + \Delta g$  – измерения в начальный момент времени.

3) Оптимальная в среднеквадратическом смысле оценка  $\hat{X}$  минимизирует дисперсию ошибки ( $M\{(X_{\text{ист}} - \hat{X})\} \rightarrow \min$ ) в области поиска решения  $\bar{X}_0 \pm \Delta_{\text{max}}$ ,  $\bar{X}_0$  – математическое ожидание равномерно распределённой случайной величины  $X_0$  на интервале  $\pm \Delta_{\text{max}}$ .

Однако такой подход при большом количестве измерений требует значительных вычислительных затрат во время движения. Для их уменьшения предлагается использовать подход, основанный на использовании ортогонального разложения измерений и алгоритмов машинного обучения. Это позволяет осуществить предварительную обработку и сократить общие вычислительные

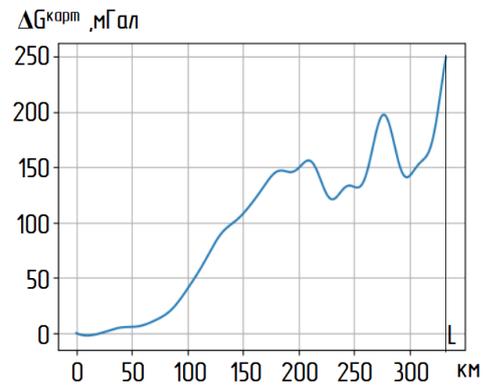


Рисунок 2. Приращение УСП по маршруту

затраты во время движения потребителя. В данной постановке задача навигации делится на два этапа: подготовительный этап и этап навигации.

Подготовительный этап (по заранее подготовленной карте):

1) Для каждого узла карты, попадающего в область поиска  $\bar{X}_0 \pm \Delta_{max}$ , формируются интервалы  $\Delta L_j(X^{карт_j}) = V \cdot t_i$  равные длине интервала коррекции. Количество таких интервалов составляет  $N_{\Delta L} = 2\Delta_{max} / \Delta L_{grid}$ . Значения УСП  $G^{карт_j} = \{g^{карт_{j0}}, \dots, g^{карт_{ji}}, \dots, g^{карт_{jN}}\}$  на интервале  $\Delta L_j(X^{карт_j})$  определяются из исходной карты  $g^{карт_{ji}} = g(X^{карт_j} + i \cdot \Delta L_{grid})$ ,  $N = V \cdot t_i / \Delta L_{grid}$  – количество измерений на  $\Delta L_j$ .

2) Для каждого интервала  $\Delta L_j$  определяются коэффициенты разложения карты  $G^{карт_j}$  по ортогональному базису  $F$ :

$$\mu_{jt} = \sum_{i=1}^N (\tilde{g}_i^{карт_j} \cdot f_{ti}), \quad j = \overline{1..N_{\Delta L}}, \quad t = \overline{1..T}, \quad (1)$$

где  $\tilde{G}_j^{карт} = \{\tilde{g}_{j1}^{карт}, \dots, \tilde{g}_{ji}^{карт}, \dots, \tilde{g}_{jN}^{карт}\}$  – приращения УСП на интервале  $\Delta L_j$ , определяемые из исходной карты ( $\tilde{g}_{j1}^{карт} = g_{j1}^{карт} - g_{j0}^{карт}$ );  $F_t = \{f_{t1}, \dots, f_{ti}, \dots, f_{tN}\}$  – функция из ортогонального базиса  $F$  значения  $f_{ti}$  которой определены в тех же точках, что и значения  $\tilde{g}_{ji}^{карт}$ ;  $t = \overline{1..T}$  – номер функции из базиса  $F$ .

Значения коэффициентов  $\mu_{jt}$  (1), рассчитанных для каждого  $\Delta L_j$  будем относить к точке с координатой  $X^{карт_j}$ . Таким образом каждая точка  $X^{карт_j}$  на маршруте  $L$  характеризуется набором параметров  $M_j = \{\mu_{j1}, \dots, \mu_{jT}\}$ .

3) С помощью алгоритма RandomForest («Случайный лес») и нейронных сетей определяется регрессионная модель  $\Psi$ , которая устанавливает соответствие между всеми координатами  $X^{карт_j}$  на маршруте  $L$  и соответствующими наборами параметров  $M_j$ :

$$X = \Psi(M), \quad (2)$$

где  $X$  – столбец координат размера  $N_{\Delta L}$  состоящий из значений  $X^{карт_j}$ ,  $M$  – матрица коэффициентов  $\mu_{jt}$  (1) размера  $N_{\Delta L} \times T$ .

Этап навигации:

На основе бортовых измерений УСП  $G^{изм}$  вычисляются параметры  $M^{изм} = \{\mu^{изм_1}, \dots, \mu^{изм_T}\}$  и определяется искомое местоположение объекта  $X_I$  на основе регрессионной модели (2):  $X_I = \Psi(M^{изм})$ .

Для сравнения оптимального алгоритма и алгоритма на основе ортогонального разложения, было проведено моделирование для трассы, представленной на Рисунке 2. Для начальных точек  $\bar{X}(t_0) = \{50\text{км}; 100\text{км}; 200\text{км}\}$  сформированы  $K=200$  случайных наборов измерений в области поиска  $\pm 15$  км с длиной интервала коррекции  $\Delta L=10$  км,  $\sigma_{изм}=1\text{мГал}$  и  $\sigma_d=10\text{мГал}$ , частота измерений составляет 10 изм/км. Шаг сетки карты 0.1 км. Для каждого набора измерений определены среднеквадратические значения ошибок по оптимальному алгоритму и алгоритму на основе ортогонального разложения Хаара с  $T=10$  (3). Результаты моделирования представлены в Таблице 1.

Если ввести упрощение, состоящее в том, что математические операции умножение, сложение и сравнение двух чисел выполняются за одинаковое количество времени ( $t_{мо}$ ), то можно оценить необходимое время для вычисления

оценки по двум алгоритмам. При исходных данных, представленных в таблице 1, необходимое время для вычисления одного значения  $\hat{X}$  составляет  $151400 \cdot t_{\text{мо}}$ , а в алгоритме на основе ортогонального разложения Хаара составляет  $13500 \cdot t_{\text{мо}}$ , что более чем в 11 раз меньше, чем по оптимальному. При этом снижение точности не превышает 10%.

Таблица 1.

Результаты моделирования для различных алгоритмов

Исходные данные	$\bar{X}(t_0)$	СКО ошибки (по опт-му Баесовскому алгоритму)	СКО ошибки (на основе функций Хаара)
$\sigma_{\text{изм}}=1\text{МГал}$ , $\sigma_d=10\text{МГал}$ , $\bar{X}(t_0) \pm 15 \text{ км}$ , $K=200$ , $\Delta L=10 \text{ км}$	50 км	2.89 км	2.95 км
	100 км	1.67 км	1.72 км
	200 км	0.30 км	0.33 км

Таким образом, разработанный поисковый алгоритм определения местоположения по маршруту движения для КЭНС по гравитационному полю Земли по точности сопоставим с оптимальным, однако время, необходимое для решения навигационной задачи, на порядок меньше.

**В третьей главе** представлена имитационная модель комплексированной помехоустойчивой аппаратуры потребителя на основе НАП ГНСС, БИНС и КЭНС по гравитационному полю и результаты ее моделирования. Данная модель предназначена для исследования перспективных методов и средств, основанных на использовании НАП ГНСС, БИНС и КЭНС по ГПЗ, в интересах навигационного обеспечения подвижных объектов.

Имитационная модель включает в себя следующие подсистемы:

- блок «объект навигации» в котором задаются параметры движения и начальные условия для моделирования маршрута. В данном блоке формируются ускорения и угловые скорости на траектории движения;
- блок «БИНС», в котором задаются параметры акселерометров и гироскопов и на выходе рассчитывается координаты объекта навигации;
- блок «НАП», в котором по данным истинной траектории формируются измерения навигационных параметров;
- блоки измерителей «измеритель ускорения свободного падения (УСП)» и «измеритель гравитационных градиентов (ГГ)» и блоки карт «карта УСП» и «карта ГГ» на область движения объекта навигации;
- блок «бортовая цифровая вычислительная машина». В него входят измеренные навигационные параметры от НАП, БИНС и измерители параметров ГПЗ, в результате работы которого формируется решение навигационной задачи.

Комплексирование реализовывалось по разомкнутой схеме. Основная схема коррекции БИНС осуществляется по оценкам навигационных параметров, сформированных в НАП ГНСС. При скачкообразном изменении отношения сигнал-шум на входе навигационного приемника или при его уменьшении ниже критического значения  $(S/N)_{\text{min}}$ , а также при скачкообразном изменении навигационных параметров от НАП на величину более чем  $\Delta X_{\text{max}}$  происходит переключение на систему коррекцией БИНС по КЭНС. Пример работы системы представлен на Рисунке 3.

Для моделирования был выбран район (Рисунок 4), на котором присутствуют области с различным градиентом ускорения свободного падения, величина которого изменялась от 0,1 мГал/км до 7 мГал/км. Интервал движения потребителя составлял 1,5 часа с момента пропадания сигнала ГНСС. Погрешность БИНС составляла 1.8 км/ч. Графики получены путем усреднения результатов многократного моделирования различных трасс движения при различных начальных положениях объекта навигации, различных направлениях и скоростях движения.

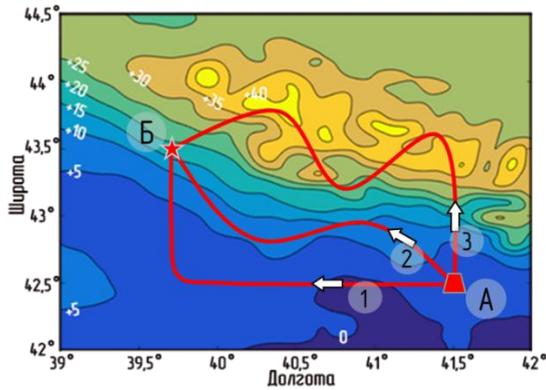


Рисунок 4. Карта ускорения свободного падения для моделирования системы навигации по ГПЗ

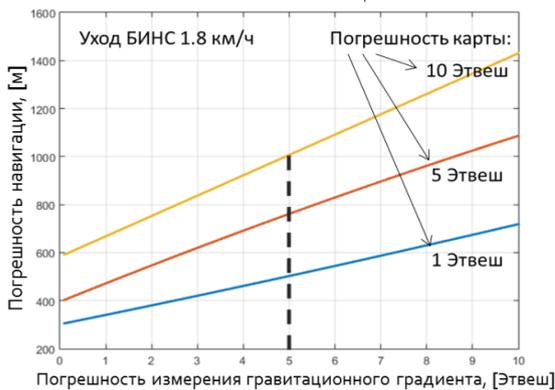


Рисунок 6. Результаты моделирования аппаратуры потребителя с использованием измерителя гравитационного градиента (ГГ)

В результате моделирования установлено, что при погрешности существующих бортовых гравиметров в 1 мГал (наземный потребитель) и погрешности карты в 0,05; 0,1 и 1 мГал, погрешность навигации составляет 380; 505

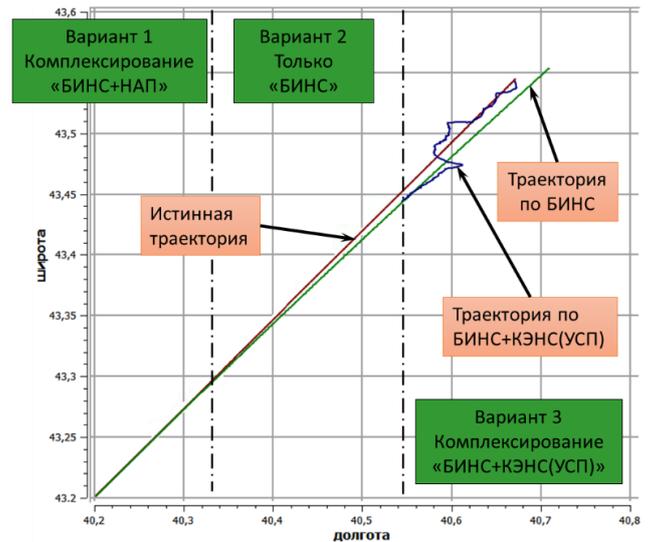


Рисунок 3. Работа комплексированной помехоустойчивой аппаратуры потребителя

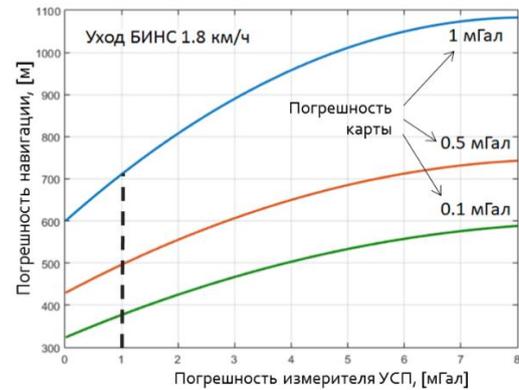


Рисунок 5. Результаты моделирования аппаратуры потребителя с использованием измерителя УСП

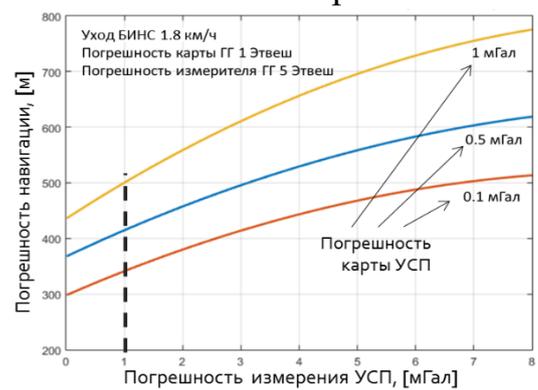


Рисунок 7. Результаты моделирования аппаратуры потребителя с совместным использованием измерителя УСП и ГГ

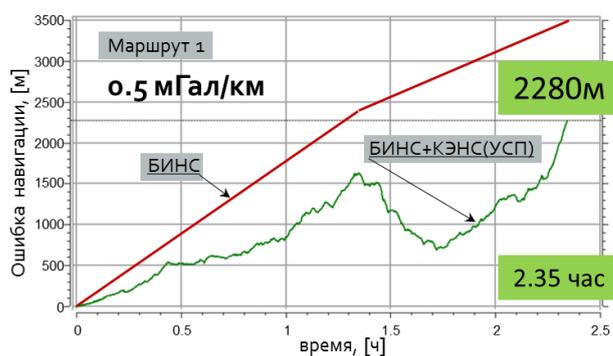
и 710 м, соответственно (Рисунок 5). При погрешности измерителя гравитационного градиента 5 Этвеш (малодинамичный низколетящий потребитель), а также при погрешности карты 1, 5 и 10 Этвеш погрешность навигации составила 510, 760 и 1020 м, соответственно (Рисунок 6). При совместном использовании гравиметра и гравитационного градиентометра (Рисунок 7) погрешность навигации уменьшается на 15% относительно использования данных измерителей по отдельности. Графики характеризуют СКО ошибки навигации на исследуемой территории.

Выбор маршрута движения объекта навигации существенным образом влияет на точность выхода подвижного объекта в заданную область пространства, что подтверждается результатами описанного ниже эксперимента.

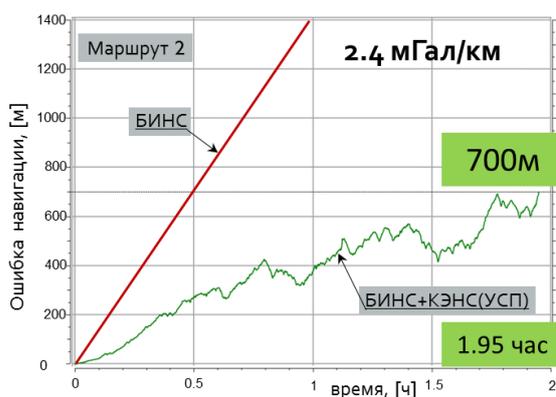
На карте УСП (Рисунок 4) выбраны две точки: точка начала движения «А», и точка окончания маршрута «Б». При движении из точки «А» в «Б» выберем три различных маршрута:

1. Маршрут 1 (кривая 1): средний градиент УСП составляет 0.5 мГал/км (слабо аномальный маршрут);
2. Маршрут 2 (кривая 2): средний градиент ускорения свободного падения по маршруту 2 составляет 2.4 мГал/км (средне аномальный маршрут);
3. Маршрут 3 (кривая 3): средний градиент УСП составляет 5 мГал/км (высоко аномальный маршрут).

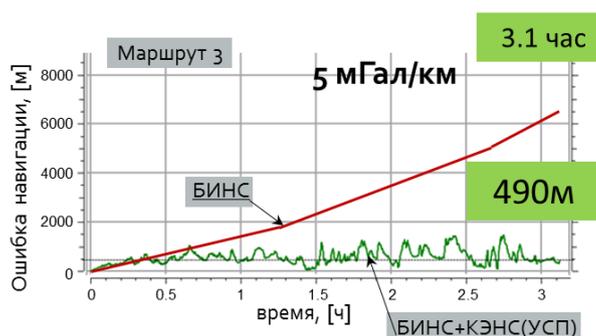
Погрешность карты и измерителя УСП составляет 0.1 мГал, погрешность БИНС не более 1.8 км/ч. Текущая ошибка местоположения объекта навигации при движении из точки «А» в точку «Б» по маршруту 1 представлена на Рисунке 8 а), по маршруту 2 и 3, соответственно на Рисунке 8 б) и в).



а)



б)



в)

Рисунок 8. Текущая ошибка местоположения:

а) по маршруту 1; б) по маршруту 2; в) по маршруту 3

По результатам моделирования видно, что при движении по слабо аномальному маршруту 1 погрешность перемещения в заданную точку простран-

ства составила 2280 м. При движении по средне аномальному маршруту 2 погрешность итогового местоположения составила 700 м, а по маршруту 3 с наибольшим градиентом поля погрешность составила 490 м.

Таким образом кратчайший маршрут не всегда будет оптимальным с точки зрения точности навигации. В рассмотренном примере протяженность высокоаномального маршрута на  $\approx 30\%$  превышает протяженность слабоаномального, однако точность навигации по высокоаномальному маршруту существенно выше.

**В четвертой главе** представлен метод повышения точности высотной основы больших территорий для формирования навигационных гравиметрических карт на основе высокостабильных стандартов частоты и времени.

Перспективные системы коррекции БИНС по измерениям параметров ГПЗ требуют создания высокоточных навигационно-гравиметрических карт. При составлении карт аномалий силы тяжести измерения, выполненные на различных высотах, редуцируются на единую поверхность, причем погрешность, вносимая неточностью знания высоты пункта измерения, составляет около 0.3 мГал/м. Эта погрешность является существенной величиной при подготовке навигационно-гравиметрических карт с погрешностью 0.01 мГал.

В настоящее время в качестве государственной системы высот используется Балтийская система высот 1977 года, отсчет высот которой ведется от нуля Кронштадтского футштока. Однако при удалении от исходного пункта накапливается погрешность определения высот, которая достигает метра и более.

В новой системе определения высот измеряемой физической величиной является разность гравитационных потенциалов. Согласно общей теории относительности, физическими эффектами, непосредственно связанными с разностью гравитационных потенциалов, являются эффекты гравитационного смещения частоты и замедления времени. Эти эффекты в настоящее время можно измерить с помощью высокостабильных стандартов частоты и времени (СЧВ). В свою очередь, разностью гравитационных потенциалов в первом приближении линейно связана с разностью ортометрических высот  $\Delta H_{\text{орт}}$  исследуемых точек через значение ускорения свободного падения  $g_{\text{ср}}$ :

$$\frac{\Delta\tau_{GR}}{\tau} = \frac{\Delta f_{GR}}{f} = \frac{\Delta\varphi}{c^2} = \frac{\int g(h) dh}{c^2} \approx \frac{g_{\text{ср}} \cdot \Delta H_{\text{орт}}}{c^2}, \quad (4)$$

где  $\Delta\tau_{GR}, \Delta f_{GR}$  – гравитационное смещение времени и частоты;  $\Delta\varphi$  – разность гравитационных потенциалов исследуемых точек;  $c$  – скорость света.

Согласно выражению (4) основным звеном квантового нивелира является пара высокостабильных СЧВ и система их синхронизации. При этом СЧВ с относительной нестабильностью  $10^{-16}, 10^{-17}$  и  $10^{-18}$  позволяют определять разность ортометрических высот с погрешностью 0.9 м, 0.09 м и 0.009 м соответственно. Погрешность современных классических нивелиров на глобальных расстояниях оценивается в метры и более.

Измеряемое расхождение шкал времени  $\Delta\tau$  мобильного СЧВ (со шкалой  $\tau_M$ ) и стационарного СЧВ (со шкалой  $\tau_0$ ) на суточном интервале  $\Delta\tau_0$  складывается из следующих составляющих:

$$\Delta\tau = \tau_M - \tau_0 = \Delta\tau_{GR} + \Delta\tau_{C1} + \Delta\tau_{C2} + \Delta\tau_T + \sigma(\tau), \quad (5)$$

где  $\Delta\tau_{GR}$  – искомый эффект релятивистского смещения шкал времени;  $\Delta\tau_{C1} = C_1\Delta\tau_0$  – собственный ход шкалы времени мобильного СЧВ за счет начальной относительной разности частот  $C_1 = \Delta f/f_0$ , по отношению к эталонной частоте  $f_0$ ;  $\Delta\tau_T = K_T \int_{\Delta\tau} \Delta T d\tau_0$  – температурное расхождение шкал, которое определяется температурным коэффициентом частоты  $K_T$  и разность температур  $\Delta T$  в точках измерения;  $\Delta\tau_{C2} = C_2\Delta\tau_0^2$  – смещение, вызванное относительной нестабильностью  $C_2$  частоты мобильного СЧВ;  $\sigma(\tau)$  – среднеквадратическая ошибка измерений.

В работе исследован метод релятивистской синхронизации, заключающийся в учете и компенсации релятивистских эффектов по маршруту движения СЧВ с помощью НАП ГНСС. Релятивистский эффект смещения времени  $\Delta\tau_{GR}$ , накапливаемый вдоль трассы движения СЧВ, определяется следующим соотношением:

$$\begin{aligned} \Delta\tau_{GR} &= \Delta\tau_{GR}^0 + \Delta\tau_{GR}^M + \Delta\tau_{\Omega}^M + \Delta\tau_V^M + \Delta\tau_S^M, \quad (6) \\ \Delta\tau_{GR}^0 &= \frac{\Delta\tau_0}{c^2} \left[ (\varphi_0^H + \varphi_0^{aH}) + \frac{1}{2} \Omega^2 (x_0^2 + y_0^2) \right], \quad \Delta\tau_V^M = -\frac{1}{2c^2} \int_{\tau_{01}}^{\tau_{02}} V(\tau_0)^2 d\tau_0, \\ \Delta\tau_{GR}^M &= -\frac{1}{c^2} \int_{\tau_{01}}^{\tau_{02}} [\varphi_M^H(\tau_0) + \varphi_M^{aH}(\tau_0)] d\tau_0, \\ \Delta\tau_{\Omega}^M &= -\frac{\Omega^2}{2c^2} \int_{\tau_{01}}^{\tau_{02}} [x_M^2(\tau_0) + y_M^2(\tau_0)] d\tau_0, \\ \Delta\tau_S^M &= -\frac{\Omega}{c^2} \int_{\tau_{01}}^{\tau_{02}} [x_M(\tau_0)V_y(\tau_0) - y_M(\tau_0)V_x(\tau_0)] d\tau_0, \end{aligned}$$

где  $\Delta\tau_{GR}^0$  – линейно нарастающая составляющая гравитационного смещения, определяемая положением базовых часов;  $c$  – скорость света;  $\varphi_0^H, \varphi_0^{aH}$  – нормальная и аномальная составляющая потенциала стационарных часов;  $\Omega$  – угловая скорость вращения Земли;  $x_0, y_0$  – координаты стационарных часов;  $\tau_0$  – текущее время по шкале стационарных часов отсчитываемые от момента начала эксперимента  $\tau_{01}$  до его окончания  $\tau_{02}$ ;  $\Delta\tau_{GR}^M$  – гравитационное смещение шкалы времени, определяемое текущим гравитационным потенциалом, изменяющимся вдоль трассы перемещения мобильных часов;  $\varphi_M^H = (\mu/\rho)[1 - J_2(R_e/\rho)P_2(\sin\psi)]$  – нормальная составляющая потенциала, определяемая нулевой и второй зональной гармоникой разложения потенциала  $J_2$ ;  $P_2(\sin\psi) = 1.5\sin^2\psi - 0.5$  – полином Лежандра;  $\mu$  – геоцентрическая гравитационная постоянная;  $\psi$  – геоцентрическая широта;  $\rho(\tau_0) = \sqrt{x(\tau_0)^2 + y(\tau_0)^2 + z(\tau_0)^2}$  – геоцентрическое расстояние точек трассы движения СЧВ;  $R_e$  – экваториальный радиус Земли;  $\varphi_M^{aH} = \frac{\mu}{\rho(\tau_0)} \left[ -\sum_{n=3}^{\infty} J_n \left( \frac{R_e}{\rho(\tau_0)} \right)^n P_n(\sin\psi) + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=1}^n \left( \frac{R_e}{\rho(\tau_0)} \right)^n (C_{nm} \cos(m\lambda) + S_{nm} \sin(m\lambda)) P_{nm}(\sin\psi) \right]$  – аномальная составляющая потенциала мобильного СЧВ, включающая зональные гармоники  $J_n$ , начиная с третьей, а также секториальные и тессеральные гармоники разложения потенциала по сферическим функциям с коэффициентами  $C_{nm}, S_{nm}$ ;  $P_{nm}(\sin\psi)$  – присоединенные полиномы Лежандра;  $\lambda$  – долгота рассматриваемой точки;  $\Delta\tau_{\Omega}^M$  – релятивистское

смещение, определяемое центробежным гравитационным потенциалом мобильных часов;  $\Delta\tau_V^M$  - релятивистское смещение, определяемое эффектом Доплера второго порядка;  $V(\tau_0)$  – текущая скорость атомных часов относительно поверхности Земли;  $\Delta\tau_S^M$  – релятивистское смещение, определяемое эффектом Саньяка.

Задача определения релятивистских эффектов смещения времени в мобильных СЧВ заключается в вычислении всех составляющих соотношения (6) методом численного интегрирования на основе текущих координат и скорости по измерениям НАП ГЛОНАСС/GPS. Погрешность вычисления  $\Delta\tau_{GR}$  с помощью НАП не превышает 1 пс. При такой точности синхронизации появляется возможность определять разность высот с погрешностью не хуже 0.09 м

Согласно выражению (5), искомое релятивистское расхождение шкал времени определяется измерениями  $\Delta\tau$  и вычисленными значениями  $\Delta\tau_{C1}, \Delta\tau_{C2}, \Delta\tau_T$ . На этой основе при участии автора были созданы два макета квантового нивелира:

- Макет №1 с использованием мобильного СВЧ – подвижные квантовые часы водородные (ПКЧВ) «Сапфир» производства ФГУП «ВНИИФТРИ» с относительной нестабильностью  $3 \cdot 10^{-15}$ . Синхронизация осуществлялась с помощью специализированных навигационных приемников GTR51;
- Макет №2 с использованием мобильного СВЧ – ПКЧ-Н производства ЗАО «Время-Ч» с относительной нестабильностью  $1 \cdot 10^{-15}$ . Синхронизация осуществлялась с помощью метода релятивистской синхронизации на основе НАП ГНСС Javad Sigma.

В качестве опорных часов в двух макетах выступал первичный эталон единицы времени, частоты и национальной шкалы времени РФ.

С помощью макета №1 были выполнены 2 эксперимента. В первом эксперименте мобильный СЧВ «Сапфир» располагался на объекте «Нагатинская пойма» в пределах г. Москвы (Эксперимент №1). Разность высот между этой точкой и первичным эталоном ГЭТ 1-2012 составляла -100 м. Во втором эксперименте мобильный СЧВ «Сапфир» размещался в горах Кавказа (объект «Кавказ»). Разность высот этой точкой и первичным эталоном ГЭТ 1-2012 составляла +1804 м (Эксперимент №2).

Сличение шкал времени первичного эталона ГЭТ 1-2012 и мобильного СЧВ «Сапфир» осуществлялось с помощью двух навигационных приемников Dicom GTR51, работающих по сигналам ГЛОНАСС/GPS. Один из них установлен рядом с ГЭТ 1-2012 и связан с его шкалой времени, а второй установлен вблизи мобильного СЧВ и связан с его шкалой времени. Гравитационное расхождение шкал времени определялось на суточном интервале наблюдения.

В течение экспериментов СЧВ находились на измеряемых точках неподвижно, поэтому слагаемое определяемое эффектом Доплера второго порядка  $\Delta\tau_V^M = 0$ , временной набег Саньяка  $\Delta\tau_S^M = 0$ . Составляющие ожидаемого расхождения шкал времени, вызванного релятивистскими эффектами на суточном интервале ( $\tau_0 = 86400c$ ) представлено в таблице 2

Таблица 2.

Составляющие  $\Delta\tau_{GR}$ 

	Эксперимент №1 «Нагатинская пойма»	Эксперимент №2 «Кавказ»
Геодезические координаты ГЭТ 1-2012 $x_0 = 2.84546 \cdot 10^6 \text{ м}$ , $y_0 = 2.16095 \cdot 10^6 \text{ м}$	СЧВ «Сапфир» $x_M = 2.85281 \cdot 10^6 \text{ м}$ , $y_M = 2.20185 \cdot 10^6 \text{ м}$	СЧВ «Сапфир» $x_M = 3.46678 \cdot 10^6 \text{ м}$ , $y_M = 3.05972 \cdot 10^6 \text{ м}$
Разность нормальных высот	100.6 м	+1804 м
$\Delta\tau_{GR}^{\Delta\varphi} = \Delta\tau_0 \cdot \frac{\Delta\varphi}{c^2} \cong \Delta\tau_0 \cdot \frac{g_{\text{ср}} \cdot \Delta H_{\text{орт}}}{c^2}$	- 0.95 нс	+16.97 нс
$\Delta\tau_{\Omega} = \Delta\tau_0 \cdot \frac{\Omega^2}{2c^2} [(x_0^2 + y_0^2) - (x_M^2 + y_M^2)]$	- 0.56 нс	-21.94 нс

Перед началом измерений был определен собственный ход мобильного СЧВ относительно ГЭТ 1-2012 ( $c_1 = \Delta f/f_0$ ) и температурный коэффициент частоты  $K_T$ . На основе полученных данных из выражения (4.2) и (4.3) получено искомое значение гравитационного эффекта:

1. Эксперимент №1:  $\Delta\tau_{GR} = -0.71 \pm 0.3$  нс при расчетном значении -0,95 нс, что соответствует разности ортометрических высот  $75 \pm 32$  м;
2. Эксперимент №2:  $\Delta\tau_{GR} = 17.45 \pm 0.3$  нс при расчетном значении 16.97 нс, что соответствует разности ортометрических высот  $1853 \pm 32$  м.

В экспериментах №1 и №2 фактором, ограничивающим точность, являлась погрешность метода синхронизации. Поэтому в Макете №2 синхронизация осуществлялась по методу релятивистской синхронизации с помощью НАП ГНСС.

Для испытаний макета №2 был проведен следующий эксперимент. Первоначально мобильный СЧВ ПКЧ-Н синхронизировался с первичным эталоном ГЭТ 1-2018, далее ПКЧ-Н перемещались на оборудованной мобильной лаборатории в Нижний Новгород и в течение 62 часов располагались в точке с разностью высот – 65 метров относительно ГЭТ 1-2018. После этого ПКЧ-Н на мобильной лаборатории возвращались обратно и повторно синхронизировались с ГЭТ 1-2018. Результаты эксперимента по вычислению разности высот двух измеряемых точек представлены в Таблице 3.

Таблица 3.

## Сводная таблица по результатам эксперимента с макетом №2

Местоположение ПКЧ-Н		Менделеево ↓ Н. Новгород	Н. Новго- род	Н. Новгород ↓ Менделеево
Время движения/время стоянки, час		8.7	62	7.2
Расхождение шкал вызванное:				
1	Собственным ходом, нс $\Delta\tau_{c_1} = \Delta\tau_0 \cdot \Delta f/f_0, \Delta f/f_0 = 3,848 \cdot 10^{-13}$	11.826	84.280	9.787
2	Температурными изменениями частоты, нс	0.0027	0.008	-0.0021
3	Релятивистскими эффектами, нс	-1.651	–	0.822
4	Влиянием центробежного потенциала при размещении ПКЧ-Н в Н. Новгороде, нс	–	-1.251	–

Согласно (5) и (6) с учетом таблицы 3 гравитационное расхождение шкал времени, вызванное разностью ортометрических высот, составляет -

1,399 нс, что соответствует разности ортометрических высот  $-57.5 \pm 9.2$  м, при действительной разности высот -65 м. В макете №2 точность измерения разности высот определялась стабильностью СЧВ, в то время как в макете №1 точность ограничивалась методом синхронизации.

В заключении приводятся основные научные результаты работы:

1) Выполнен обзор методов построения КЭНС по гравитационному полю, которые могут быть использованы при комплексировании с НАП ГНСС. Анализ показал, что существующие поисковые алгоритмы КЭНС не обеспечивают требуемой оперативности. Погрешности высотной привязки систем подготовки навигационных гравиметрических карт вносят дополнительные ошибки в формировании исходных карт для обеспечения навигации. Кроме того, анализ показал, что к настоящему времени отсутствует модель комплексной аппаратуры потребителя, включающей в себя НАП, БИНС и КЭНС по гравитационному полю, которая позволила бы исследовать данный тип аппаратуры.

2) В работе предложен алгоритм навигации на основе ортогонального разложения бортовых измерений и значений навигационной карты. Такой подход позволил на порядок уменьшить вычислительную нагрузку на бортовое оборудование по сравнению с алгоритмом, минимизирующим дисперсию ошибки при сопоставимом уровне точности.

3) Разработана имитационная модель комплексированной помехоустойчивой навигационной аппаратуры потребителя на основе НАП ГНСС и КЭНС, использующей гравитационное поле. Данная модель позволяет:

а) Исследовать характеристики точности комплексированной помехоустойчивой аппаратуры на основе НАП ГНСС, БИНС и КЭНС по гравитационному полю при движении по различным маршрутам;

б) Исследовать влияние точности карт и точности измерителей на итоговую точность навигации для исследуемой территории;

в) Исследовать варианты комплексирования НАП с различным набором гравитационных измерителей, а также конструировать различные алгоритмы навигации и проверять их эффективность.

4) Точность определения положения объекта навигации из точки «А» в точку «Б» с использованием комплексированной системы БИНС+КЭНС существенно зависит от степени неоднородности поля ГПЗ на маршруте движения, в отличие от спутниковых систем навигации. В связи с этим, для обеспечения высокой точности навигации целесообразно использовать движение по высокоаномальному маршруту, даже в ущерб времени движения.

5) Исследован метод повышения точности высотной основы для привязки навигационных гравиметрических карт на основе «квантового нивелира», выполненного на основе высокостабильных стандартах частоты и времени и высокоточных системах их синхронизации. Впервые в РФ с участием автора проведен релятивистский эксперимент по измерению разности высот с помощью гравитационного эффекта замедления времени.

б) Обоснована достижимая точность метода релятивистской синхронизации которая составляет 1 пс, что, в свою очередь, обеспечивает погрешность измерения разности ортометрических высот менее 10 см.

Таким образом, в диссертационной работе решена задача повышения точности комплексированной системы навигации на основе НАП ГНСС и КЭНС с использованием измерений параметров гравитационного поля Земли. Цель диссертационной работы достигнута.

**Основные положения диссертации отражены в следующих работах:**

1. Рыбаков Е.А. Исследование системы навигации по гравитационному полю Земли при движении по различным маршрутам // Альманах современной метрологии. 2020. №4 (24). С. 104-111. (0.56 п.л.)
2. Рыбаков Е.А. Метод повышения точности определения местоположения по измерениям параметров гравитационного поля на основе моментных функций // Альманах современной метрологии. 2020. №2 (22). С. 59-66. (0.33 п.л.)
3. Макет системы навигации по геофизическим полям Земли / Рыбаков Е.А. [и др.] // Альманах современной метрологии. 2020. №4 (24). С. 173-184. (0.88 п.л./0.35 п.л.)
4. Рыбаков Е.А., Фатеев В.Ф., Смирнов Ф.Р. Метод релятивистской синхронизации мобильных атомных часов и его экспериментальная проверка // Письма в Журнал технической физики, 2017, Т.43, Вып. 10, С. 3-11. Doi: 10.21883/PJTF.2017.10.44614.16624 (0.27 п.л./0.17 п.л.)
5. Measurement of the difference in the Earth's gravitational potentials with the help of a transportable quantum clock / Rybakov E.A. [et al.]// Doklady Earth Sciences, 2017, Vol. 472, Part 1, pp. 91–94. Doi:10.1134/S1028334X17010147 (0.50 п.л./0.25 п.л.)
6. Experimental Determination of Orthometric Heights Difference Based on Gravitational Effects of Time Dilation/ E.A. Rybakov [et al.] // 4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements, 12-15 April 2016, Saint Petersburg, Russia, pp. 228–232. ISBN 978-5-91995-033-2. (0.63 п.л./0.38 п.л.)
7. Фатеев В.Ф., Сысоев В.П., Рыбаков Е.А. Экспериментальное измерение гравитационного эффекта замедления времени с помощью перевозимых квантовых часов// Измерительная техника. 2016. №4. С. 41-43. (0.38 п.л./0.19 п.л.)
8. База данных результатов расчета цифровой модели уточненной версии государственной геоцентрической системы координат /Денисенко О.В., Сильвестров И.С., Фатеев В.Ф., Давлатов Р.А., Рыбаков Е.А., Лопатин В.П., Кузьмин Н.И.// Свидетельство о регистрации базы данных RUS 2018621273 13.07.2018
9. Рыбаков Е.А., Денисенко О.В., Фатеев В.Ф. Ассистирующая технология глобальной навигации на основе геофизических полей земли и оценка ее точности // Мир измерений. 2018. № 1. С. 24-27. (0.46 п.л./0.14 п.л.)
10. Рыбаков Е.А., Фатеев В.Ф. Оценка точности навигации с использованием ассистирующей технологии ГЛОНАСС на базе измерения параметров геофизических полей // Метрология времени и пространства Материалы IX Международного симпозиума. ФГУП «ВНИИФТРИ». 2018. С. 118-125. (0.56 п.л./0.34 п.л.)