

«Центр квантовых измерений» ФГУП «ВНИИФТРИ» и его назначение

© С. И. Донченко, В. Ф. Фатеев

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Московская обл., Россия

Реферат

В статье рассмотрены главные цели организации «Центра квантовых измерений» (далее Центра), который создается во ФГУП «ВНИИФТРИ» в связи с поручением Заместителя Председателя Правительства Российской Федерации, Министра промышленности и торговли Российской Федерации, Д. В. Мантурова от 06.05.2024 г. Центр предназначен для достижения нового уровня тактико-технических характеристик национальной шкалы времени UTC (SU), развития средств фундаментального обеспечения ГЛОНАСС, а также для создания помехозащищенных систем автономной навигации (САН), основанных на измерениях гравитационного и магнитного полей Земли (ГПЗ и МПЗ). Главные цели создания Центра: создание единого эталона частоты, времени, длины и гравиметрии; разработка более совершенных высокостабильных стационарных и мобильных стандартов частоты и времени, разработка квантовых навигационных датчиков параметров ГПЗ и МПЗ в интересах создания геофизических САН. Рассмотрено влияние ГПЗ на эталонную частоту, время и длину.

В работе показано, что при создании вторичных эталонов необходимо знать точные координаты и скорость движения точки установки вторичного эталона. Рассмотрена возможность создания следующего поколения квантовых гравиметрических эталонов. При обсуждении направлений создания высокостабильных стандартов частоты и времени (СЧВ) отмечено, что главной проблемой в этой области становится создание ядерных СЧ и методов сличения их частот. Рассмотрены проблемы создания высокоточных квантовых навигационных датчиков параметров ГПЗ и МПЗ. Отмечено, что решение этой проблемы основано на использовании достижений физики: интерферометрии на волнах де Бройля, интерферометрических гравитационно-волновых антенн, а также сверхстабильных СЧВ. Проанализированы проблемы создания и возможности квантовых атомных гравиметров «фонтанного» типа, а также гравиметров на Бозе-Эйнштейна конденсате с использованием состояний «запутанности» холодных атомов. Проведена оценка возможности создания квантовых оптических датчиков ГПЗ: наземных гравиметров, а также космических однопутниковых и многопутниковых (кластерных) гравитационных измерителей. Проанализированы возможности криогенных гравиметров. Рассмотрены малогабаритные квантовые магнитометры, на основе которых могут быть созданы САН по МПЗ. Представлены перспективы создания квантовых нивелиров на основе высокостабильных СЧВ, а также геодезической сети страны «Квантовый футшток».

Ключевые слова: эталоны частоты, времени, длины; высокостабильные стандарты частоты и времени, квантовые атомные гравиметры; квантовые оптические гравиметры и градиентометры; криогенные гравиметры, квантовый нивелир.

Контакт для связи: Фатеев Вячеслав Филиппович (generalifat@mail.ru).

Для цитирования: Донченко С. И., Фатеев В. Ф. «Центр квантовых измерений» ФГУП «ВНИИФТРИ» и его назначение // Труды ИПА РАН. 2025. Вып 74. С. 16–29.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.74.16-29>

“Quantum Measurement Center” of the Federal State Unitary Enterprise “VNIIFTRI” and Its Purpose

S. I. Donchenko, V. F. Fateev

FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleev settlement, Moscow region, Russia

Abstract

The article examines the purpose and primary objectives of the “Quantum Measurement Center” (hereinafter referred to as the Center), established at the Federal State Unitary Enterprise “VNIIFTRI” in accordance with the instruction of the Deputy Chairman of the Russian Federation Government — Minister of Industry and Trade of the Russian Federation D. V. Manturov, dated May 6, 2024. The Center aims to elevate the tactical and technical characteristics of the national time scale UTC (SU), develop essential support tools for GLONASS, and create interference-resistant autonomous navigation systems (ANS) based on measurements of the Earth's gravity and magnetic fields (EGF and EMF). The main goals of establishing the Center include: developing a unified standard for frequency, time, length and gravimetry; creating advanced, highly stable stationary and mobile standards for frequency and time; development of quantum navigation sensors of EGF and EMF parameters to support the creation of geophysical ANS. The influence of the Earth's gravity field on frequency, time and length standards is also considered.

It is highlighted that, in the development of secondary standards, precise knowledge of the coordinates and velocity of the secondary standard installation point is necessary. The possibility of creating next-generation quantum gravimetric standards is discussed. In the context of developing highly stable frequency and time standards (FTS), the main challenge is identified as the creation of nuclear FTS and methods for frequency comparison. The article also addresses the challenges involved in developing high-precision quantum sensors for measuring EGF and EMF parameters. It emphasizes that solutions rely on advancements in physics, such as interferometry with de Broglie waves, interferometric gravitational wave antennas, and ultra-stable FTS. Furthermore, the development of quantum atomic gravimeters of the “fountain” type and gravimeters based on Bose-Einstein condensates employing entangled cold atom states are analyzed. The possibilities for creating quantum optical sensors for EGF measurement are also explored, including ground-based gravimeters and space-based single-satellite and multi-satellite (cluster) gravitational meters. The capabilities of cryogenic gravimeters are examined, along with small-sized quantum magnetometers that could serve as the basis for electromagnetic field (EMF) navigation systems (SANs). Finally, prospects for establishing quantum standards based on highly stable quantum FTS, as well as integrating these into the country’s geodetic network (“Quantum Footstock”), are presented.

Keywords: standards of frequency, time, length; highly stable standards of frequency and time, quantum atomic gravimeters; quantum optical gravimeters and gradiometers; cryogenic gravimeters, quantum level.

Contacts: Vyacheslav F. Fateev (generalfat@mail.ru).

For citation: Donchenko S. I., Fateev V. F. “Quantum Measurement Center” of the Federal State Unitary Enterprise “VNIIFTRI” and its purpose // Transactions of IAA RAS. 2025. Vol. 74. P. 16–29.
<https://doi.org/10.32876/AplAstron.74.16-29>

Введение

«Центр квантовых измерений» ФГУП «ВНИИФТРИ» (далее — Центр) создается по поручению Заместителя председателя правительства Российской Федерации, Министра промышленности и торговли Российской Федерации, Д. В. Мантурова от 06.05.2024 г. Центр предназначен для достижения нового уровня тактико-технических характеристик национальной шкалы времени UTC (SU), обеспечения развития средств фундаментального обеспечения ГЛОНАСС в рамках Федерального проекта «Навигация и время», а также для создания систем помехозащищенной автономной навигации, основанных на измерениях параметров гравитационного и магнитного полей Земли (ГПЗ и МПЗ).

Главные цели создания Центра состоят в разработке следующих новых квантовых измерительных средств:

1) единого эталона частоты, времени, длины и эталонов единиц измерения параметров гравитационного поля Земли (ГПЗ);

2) более совершенных высокостабильных стационарных и мобильных стандартов частоты и времени, а также методов сличения их частот и сравнения их шкал времени;

3) квантовых навигационных датчиков параметров ГПЗ и МПЗ, в том числе квантовых атомных гравиметров и магнитометров, квантовых оптических наземных и космических гравиметров и грави-градиентометров, криогенных сверхчувствительных датчиков ГПЗ, а также квантовых геодезических средств.

Данная статья основана на докладе, сделанном авторами на Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-25)»,

и посвящена рассмотрению перспектив развития квантовых измерительных средств, создаваемых в рамках Центра. Создаваемые новые квантовые средства предназначены для повышения уровня отечественной метрологической базы, для развития высокоточных средств глобального геодезического обеспечения, а также для создания новых систем автономной навигации, которые не подвержены воздействию радиоэлектронных помех.

Единый комплекс Государственного первичного эталона частоты, национальной шкалы времени, длины и гравиметрии в гравитационном поле Земли

Единый комплекс Государственного первичного эталона частоты – времени, длины и гравиметрии предназначен для решения следующих главных задач:

— воспроизведение единицы частоты на основе использования современных высокостабильных оптических стандартов частоты. Согласно опубликованным данным ([Нореп и др., 2023](#)), в настоящее время Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2022 обеспечивает воспроизводимость частоты на атомах цезия с относительной погрешностью $5 \cdot 10^{-16}$;

— хранение шкалы времени, формируемой квантовыми часами на основе высокостабильных оптических стандартов частоты. В настоящее время эталонный комплекс хранения времени ГЭТ 1 обеспечивает относительную погрешность хранения шкалы времени $3 \cdot 10^{-16}$;

— разработка ядерного стандарта частоты, в частности на изомерном переходе в ядре тория-229;

— высокоточное воспроизведение единицы длины, что возможно на основе перспективных

лазерных интерферометров. В настоящее время в РФ относительная погрешность воспроизведения единицы длины на основе лазерных интерферометров составляет 10^{-12} ;

— формирование высокоточной национальной шкалы времени РФ;

— расширение состава первичных специальных гравиметрических эталонов за счет дополнительного создания эталона единицы измерения отклонения отвесной линии, эталона единицы измерения разности гравитационных потенциалов, а также эталонов других трансформант потенциала ГПЗ. В настоящее время в России существует только один гравиметрический эталон — Государственный первичный эталон единицы ускорения в гравиметрии ГЭТ 190-2023.

Влияние гравитационного поля на комплекс эталонов частоты – времени – длины

Единый комплекс первичных эталонов целесообразно создавать на базе существующего Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1 и компактно размещать вблизи одной пространственной точки на территории ФГУП «ВНИИФТРИ».

Вторичные эталоны частоты — времени — длины размещаются в других точках околоземного пространства как на поверхности Земли, так и в ближайшем космосе. Эти новые точки имеют другие координаты и скорости перемещения. Для каждой новой точки размещения эталона, в соответствии с общей теорией относительности, необходимо учитывать релятивистские и гравитационные эффекты смещения частоты, замедления времени и изменения масштаба длины. Космические вторичные эталоны могут располагаться также на борту навигационных КА, движущихся по околокруговым средневысотным, геостационарным и низковысотным орбитам, а также по эллиптическим орбитам.

Как следует из выводов прикладной релятивистской метрологии, основанной на использовании методов общей теории относительности (Фатеев, 2018), вторичные часы, размещенные на поверхности Земли в точке с большей ортометрической высотой, идут быстрее эталонных часов, расположенных внизу. При этом изменение высоты квантовых микроволновых часов на 100 м вызывает относительное изменение задающей частоты этих часов на величину 10^{-14} . Это вызывает такое же относительное смещение шкалы времени этих часов. Поэтому для установления одинакового темпа времени вторичных часов их надо периодически корректировать.

Гравитационное поле влияет также на глобальные геодезические измерения длины. На территории страны гравитационная поправка в гео-

дезические измерения расстояний достигает нескольких миллиметров.

Вследствие влияния ГПЗ вторичные часы, размещенные на средневысотной круговой орбите, «убегают» по времени относительно первичных эталонных часов, установленных на Земле. Поэтому они также нуждаются в коррекции. Примером являются спутниковые вторичные часы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Для системы ГЛОНАСС такое «убегание» спутниковых часов известно и в сутки составляет 37.6 мкс, для GPS — 38.6 мкс. Эти смещения шкал вторичных спутниковых часов надо корректировать, поскольку они вызывают недопустимо большие погрешности навигации. В частности, коррекция такого «убегания» спутниковых часов на круговой орбите достигается изменением частоты их задающего генератора на известную величину. На эллиптической орбите коррекция вторичных часов выполняется по более сложному алгоритму (Фатеев, 2023). Вывод: эталон времени, эталон частоты, а также эталон длины в ГПЗ имеют смысл только в точке с известными координатами и известной скоростью движения. При изменении координат и скорости эталоны перестают быть таковыми.

Комплекс квантовых гравиметрических эталонов

В настоящее время в РФ создан лишь один гравиметрический эталон: Государственный первичный специальный эталон (ГПСЭ) единицы ускорения в гравиметрии: ГЭТ 190-2023 (ВНИИМ им. Д. И. Менделеева). Он основан на использовании квантового оптического (лазерного) абсолютного баллистического гравиметра (АБГ) и имеет погрешность 4 мкГал. ФГУП «ВНИИФТРИ» обладает вторичным эталоном ускорения в гравиметрии, который основан на лазерном АБГ типа FGL.

Дальнейшее повышение точности эталона единицы ускорения свободного падения (УСП) связано с созданием квантовых атомных гравиметров «фонтанного» типа и гравиметров на Бозе-Эйнштейна конденсате, а также с созданием высокоточных криогенных гравиметров.

С созданием и развитием парка систем автономной навигации, использующих измерения параметров ГПЗ, необходима разработка следующего поколения квантовых эталонных гравиметрических средств:

1) эталона единицы разности гравитационных потенциалов, который уже в ближайшее время может быть создан на оптических СЧВ;

2) эталона единицы отклонения отвесной линии (УОЛ) на основе астроизмерителя, созданного во ФГУП «ВНИИФТРИ» и основанного на квантовом оптическом приемнике на ПЗС-матрице. При использовании квантового оптического приемника

на КМОП-технологиях инструментальные погрешности измерений эталона могут быть снижены;

3) эталонов единиц вертикальных и горизонтальных вторых пространственных производных потенциала ГПЗ, в том числе, на основе криогенных гравиметров.

Характеристики вторичных гравиметрических эталонов, как и эталонов частоты-времени, также зависят от координат точки измерения в гравитационном поле. Известно, что при изменении высоты размещения вторичного эталона УСП на 1 см необходимая поправка в измеряемое значение ускорения составляет 3 мкГал ($3 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$), что соизмеримо с погрешностью первичного эталона.

Квантовые стандарты частоты и времени, предполагаемые к разработке в Центре квантовых измерений

Типы разрабатываемых стандартов частоты и времени

В Центре предполагается разработка следующих типов высокостабильных квантовых стандартов частоты и времени (СЧВ): микроволновых, оптических и ядерных.

К настоящему времени во ФГУП «ВНИИФТРИ» в составе государственного эталона ГЭТ 1-2022 (Норев и др., 2023) уже созданы и эксплуатируют-

ся микроволновые СЧВ (рис. 1): перевозимые водородные квантовые часы, а также эталонный водородный комплекс времени и частоты. В составе ГЭТ 1 также используются 6 стандартов частоты «фонтанного» типа на холодных атомах рубидия и цезия. Кроме того, создан сверхминиатюрный рубидиевый квантовый стандарт частоты и времени.

В создаваемом Центре будет продолжена модернизация состава и характеристик ГЭТ 1. К 2027 г. в рамках Центра планируется создание метрологических реперов на атомах цезия, к 2030 г. запланировано создание репера частоты на атомах рубидия «фонтанного» типа. Один из путей дальнейшего повышения стабильности водородных СЧВ связан с так называемой двойной сортировкой атомов (Polyakov et al., 2021), которая обеспечивает повышение стабильности частоты и времени в несколько раз.

Другое стратегическое направление совершенствования характеристик ГЭТ 1 основано на использовании оптических сверхстабильных стандартов частоты (ОСЧ). При создании ГЭТ 1-2022 в 2020 г. во ФГУП «ВНИИФТРИ» на ОСЧ при воспроизведении частоты достигнута неисключенная систематическая погрешность (НСП) менее $1 \cdot 10^{-17}$. К 2036 г. эту величину в ОСЧ планируется существенно снизить.

Микроволновые стандарты частоты и времени

Перевозимые
квантовые часы
водородные



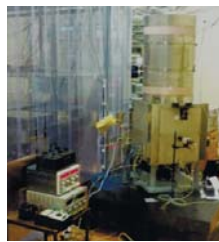
$$\sigma_{1 \text{ сут}} \leq 5.0 \cdot 10^{-16}$$

Эталонный
водородный
комплекс времени
и частоты



$$\sigma_{1 \text{ сут}} \leq 3.0 \cdot 10^{-16}$$

Метрологический
цезиевый репер на
фонтане холодных
атомов



$$\text{НСП} \leq 5.0 \cdot 10^{-16}$$

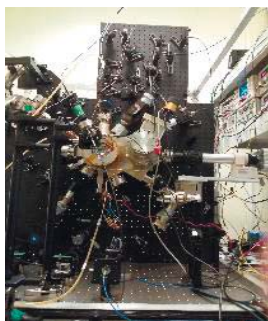
Сверхминиатюрный
квантовый стандарт
частоты



$$\sigma_{1 \text{ сут}} \leq 5.0 \cdot 10^{-12}$$

Оптические стандарты частоты и времени

Мобильный ОСЧ 2030 г.



$$\text{В } 2020 \text{ г. НСП} \leq 1.0 \cdot 10^{-17}$$



Ядерные стандарты
частоты и времени
на основе тория 229
 $\text{НСП} \leq 10^{-19} - 10^{-20}$

Кооперация:
ФГУП «ВНИИФТРИ»,
ФИАН,
МИФИ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ
и др.

Рис. 1. Микроволновые и оптические СЧВ ФГУП «ВНИИФТРИ»

Третье стратегическое направление совершенствования реперов частоты, которое будет развиваться в Центре, связано с разработкой ядерных стандартов частоты. Для таких СЧ характерна неисключенная систематическая погрешность, которая существенно меньше, чем в ОСЧ, что весьма важно для создания перспективной геодезической системы «Квантовый футшток» (см. ниже). Создание ядерного СЧ представляет серьезную техническую проблему. Поэтому его реализация предполагается в широкой кооперации, в которую кроме ФГУП «ВНИИФТРИ» будут включены институты, имеющие необходимый задел по этой теме, в частности: ФИАН (РАН), МИФИ (Министерство науки и образования), РФЯЦ-ВНИИЭФ (Росатом), ВНИИЭМ (Росстандарт) и др.

Задел и перспективы создания систем сравнения шкал времени и сличения частот разнесенных СЧВ

Важнейшей частью системы разнесенных измерительных СЧВ различных типов является система сравнения их шкал времени и система сличения частот. ФГУП «ВНИИФТРИ» в последние

годы накопил опыт в этой области при испытаниях квантовых нивелиров, основанных на использовании микроволновых водородных СЧВ (рис. 2). Обозначенные на схеме данные и переменные описаны в статье (Фатеев и др., 2025).

В первом эксперименте (2015 г.) перебазированный СЧВ «Сапфир» располагался в Нижнем Архызе, сравнение ШВ ГЭТ 1-2012 и «Сапфира» выполнялось с помощью сигналов ГНСС. Во втором эксперименте (2019 г.) перебазированные водородные квантовые часы (ПКЧН, изготовитель ЗАО «Время-Ч») на автомобиле доставлялись в Иркутский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ». Решалась задача высокоточной передачи шкалы времени от ГЭТ 1-2018 на СЧВ Иркутского филиала. Для измерений использовался метод релятивистской синхронизации на основе мобильных часов (Фатеев и др., 2024, стр. 296). В третьем эксперименте ПКЧВ доставлялись в г. Евпаторию, решалась задача синтонизации задающих частот ГЭТ 1-2018 и мобильного ПКЧВ. Наконец, был выполнен эксперимент по сравнению ШВ двух СЧВ через систему «Дуплекс» и геостационарный спутник «Экспресс-80».

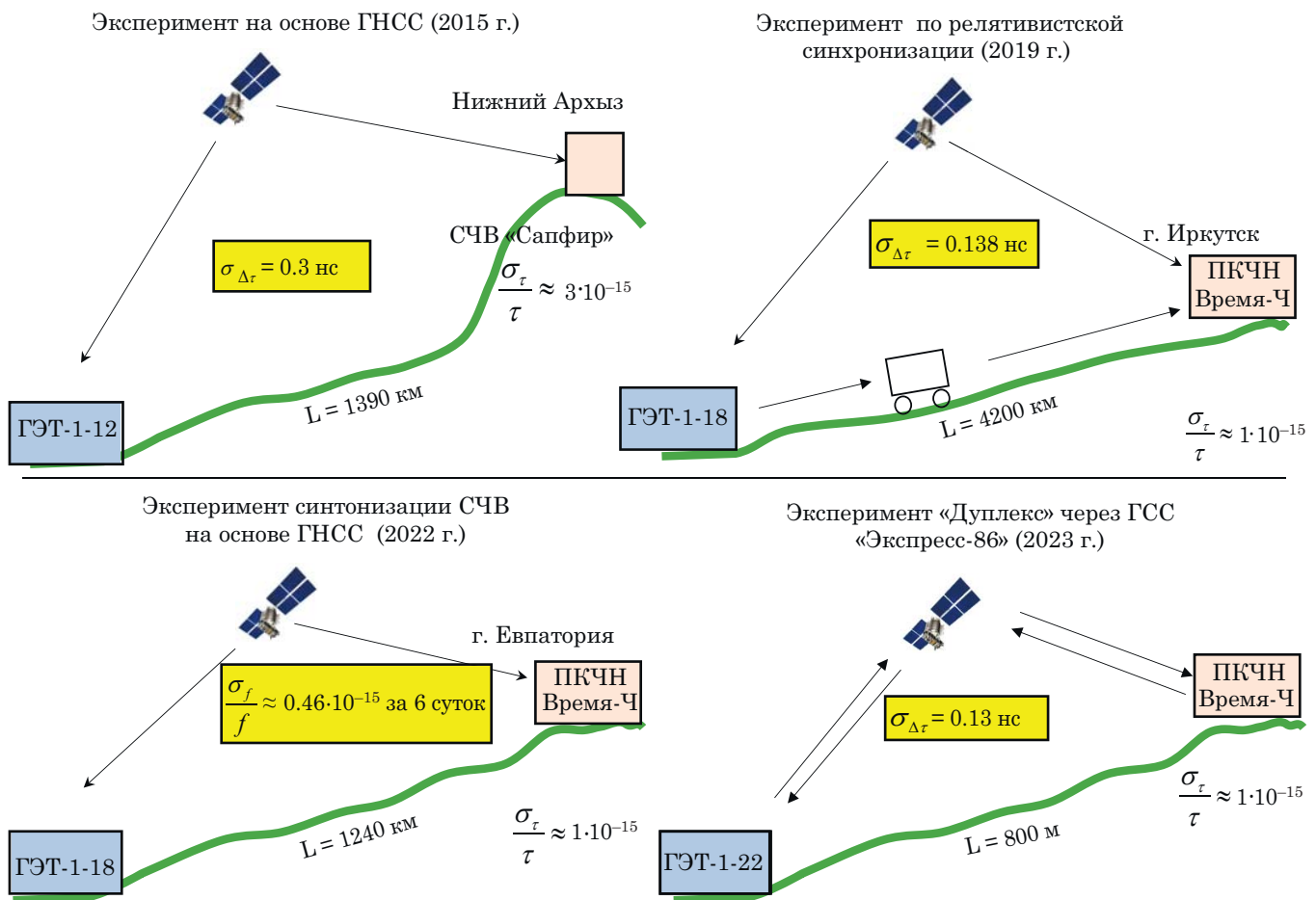


Рис. 2. Эксперименты ФГУП «ВНИИФТРИ» по сличению частот и сравнению ШВ пространственно разнесенных водородных СЧВ

Что касается использования волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) для сличения частот пространственно разнесенных оптических стандартов частоты, то в РФ имеется опыт таких измерений. В одном из отечественных лабораторных экспериментов ([Федорова и др., 2015](#)) использовалась катушка ВОЛС длиной 100 км. В измерениях использовался метод компенсации неопределенности фазы на трассе распространения. В другом отечественном лабораторном эксперименте на ВОЛС ([Хабарова и др., 2016](#)) также решалась задача сличения частот СЧВ.

В целом, в РФ накоплен необходимый опыт высокоточного сравнения шкал времени микроволновых СЧВ с использованием ГНСС, системы «Дуплекс», а также метода релятивистской синхронизации. Наилучшие результаты показал последний из перечисленных методов. Вместе с тем, более высокую точность сравнения ШВ можно получить на основе высокоточной квантово-оптической системы (КОС) «Точка», имеющейся во ФГУП «ВНИИФТРИ». В рамках Центра планируется провести целый ряд новых экспериментов, направленных на повышение точности сравнения шкал времени микроволновых СЧВ, а также на повышение точности сличения частот ОСЧ с помощью глобальных ВОЛС.

Постановка задачи создания квантовых навигационных измерителей

Погрешность бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС), являющихся основой современных САН, накапливается со временем и на протяженных трассах движения их показания необходимо корректировать. Глобальность и устойчивость системы коррекции БИНС в условиях помех можно обеспечить за счет дополнительного измерения на борту подвижного средства параметров ГПЗ и МПЗ.

Исследования показали, что современные бортовые гравиметры обеспечивают на холмистом рельефе погрешность навигации в сотни метров. Однако для осуществления «бесшовой» навигации, при которой погрешность навигации соизмерима с погрешностью ГНСС, погрешность гравиметров должна быть существенно меньше. Вместе с тем, существующие технологии гравиметрии и магнитометрии такую погрешность не обеспечивают. В этой связи для систем автономной навигации предложено создание системы высокоточных квантовых измерителей параметров ГПЗ и МПЗ.

Такие возможности открываются в результате следующих научных открытий в современной физике:

1) освоение высоких частот волн де Бройля «холодных» атомов и ионов (до 10^{24} Гц), что обеспечивает существенное продвижение в точности

атомной интерферометрии и в точности атомных гравиметров;

2) достижение очень высокой точности квантовых оптических интерференционных измерителей перемещений отражающих зеркал в современных лазерных гравитационно-волновых антеннах, что открывает широкий простор для повышения точности акселерометров и гравиметров;

3) многократное экспериментальное подтверждение эффектов общей теории относительности в ГПЗ, что открывает новые возможности в создании приборов для глобальной геодезии;

4) Создание ОСЧ с очень низкой относительной погрешностью воспроизводимости частот (до 10^{-18}), а также экспериментальное обоснование новых возможностей создания ядерных стандартов частоты, имеющих рекордно низкую погрешность воспроизводимости частот (до 10^{-19} – 10^{-20}).

Сверхминиатюрные квантовые хранители бортового времени САН

Точное бортовое время на борту подвижного средства необходимо для обеспечения высокой точности БИНС при интегрировании измеряемых ускорений. Кроме того, наличие высокоточной бортовой шкалы необходимо при длительных интервалах автономного движения средства навигации. В отсутствие сигналов ГНСС точное бортовое время в системе автономной навигации наземных и космических потребителей можно получить от малогабаритных квантовых бортовых рубидиевых стандартов частоты, которые созданы во ФГУП «ВНИИФТРИ» ([Скворцов и др., 2020](#)) (рис 1). Эти стандарты частоты характеризуются нестабильностью не хуже 10^{-11} – 10^{-12} , малым энергопотреблением, весом до 0.3 кг. Во ФГУП «ВНИИФТРИ» ведется подготовка к их серийному производству. В Центре предполагается дальнейшее развитие сверхминиатюрных квантовых СЧВ в направлении повышения их стабильности и эксплуатационных характеристик.

Квантовые гравиметрические средства

Широко известные лазерные АБГ, несмотря на высокие достигнутые показатели точности, обладают крупным недостатком: низкой оперативностью измерений. Дело в том, что на развертывание, проведение измерений УСП и приведение прибора в состояние транспортировки требуется около трёх суток.

Квантовые гравиметры «фонтанного» типа

В последние годы в целом ряде зарубежных фирм созданы рабочие группы специалистов и развернуты работы по созданию абсолютных квантовых атомных гравиметров (КАГ) на холодных атомах, которые обладают более высокой оперативностью измерений. В приборах этого типа

используется интерференция материальных волн де Бройля двух вертикально падающих в гравитационном поле потоков холодных атомов («фонтанов» атомов). Наибольшие успехи в создании КАГ «фонтанного» типа достигнуты следующими исследовательскими коллективами:

— группой доктора Стивена Чу (США) (*стационарный* КАГ чувствительностью 8 мкГал/ $\sqrt{\text{Гц}}$ и точностью 2–3 мкГал);

— группой LNE-SYRTE (Франция) (*транспортируемый* КАГ с чувствительностью 6 мкГал/ $\sqrt{\text{Гц}}$ и точностью 1–2 мкГал);

— группой университета Humboldt (Германия) (*транспортируемый* КАГ чувствительностью 20 мкГал/ $\sqrt{\text{Гц}}$);

— группой университета Huazhong (Китай) (*стационарный* КАГ с чувствительностью 4 мкГал/ $\sqrt{\text{Гц}}$ и точностью несколько единиц мкГал). Прибор выставлен на продажу.

Здесь следует отметить, что *мобильные* квантовые гравиметры, способные работать на борту наземного, морского или воздушного транспортного средства во время движения, нигде в мире пока не созданы.

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» сформирована рабочая группа специалистов по созданию стационарного образца КАГ «фонтанного» типа. На сегодняшний день у этой группы имеется значительный задел: создана лазерная оптическая система, атомный спектроскоп и система управления прибором. Получены облака холодных атомов руби-

дия в основной и вспомогательной атомных ловушках (рис. 3).

При создании прибора предусмотрена компенсация влияния различных внешних факторов на точность измерений: сейсмических колебаний, горизонтальных гравитационных градиентов и др.

Квантовые гравиметры на конденсате Бозе — Эйнштейна

Атомы в состоянии Бозе — Эйнштейна конденсата (БЭК) открывают возможность создания портативных и высокоточных гравиметров на основе использования другой формы обеспечения когерентности материальных волн атомов. В этом случае используются сгустки (или облака) атомов в состоянии т. н. БЭК, главной характеристикой которого является когерентное состояние волн де Бройля всех атомов в облаке. Число атомов в облаке достигает 10^5 – 10^7 , при этом размеры облака атомов БЭК не превышают 1–2 мм ([Jo, et al, 2007](#); [Böhi, et al, 2009](#)).

Используя небольшие облака атомов БЭК, можно существенно уменьшить размер измерительной камеры по сравнению с КАГ «фонтанного» типа. При этом выполняется электрическое управление потоками атомов и обеспечение интерференции волн де Бройля с помощью атомного чипа (Atom chip). Создание интегрированных вспомогательных электронных, лазерных, вакуумных модулей делает систему в целом достаточно компактной.



Рис. 3. Абсолютный квантовый атомный гравиметр «фонтанного» типа ФГУП «ВНИИФТРИ»

Основное преимущество использования облаков БЭК-атомов вместо падающих потоков охлажденных атомов, как это сделано в гравиметрах «фонтанного» типа, заключается в малых скоростях атомов и в высокой когерентности волн де Бройля вследствие малого разброса их скоростей. Благодаря этому вакуумную камеру для интерференции атомов можно сделать компактной. Это преимущество обеспечивает высокую чувствительность и малый дрейф результатов измерения ускорения свободного падения.

Квантовые атомные гравиметры обладают более высокой оперативностью, нежели лазерные АБГ: ожидаемое время измерения в одной пространственной точке составляет 1–1.5 ч. Вместе с тем, главный недостаток и лазерных АБГ и абсолютных атомных гравиметров состоит в возможности измерения только одной составляющей УСП, которая направлена вдоль силовой линии ГПЗ. Для определения всех составляющих УСП, ориентированных по осям земной системы координат, используемой в гравиметрической системе автономной навигации, необходимы дополнительные измерения составляющих отклонения отвесной линии, выполненные в этой же точке.

Возможности использования свойства квантовой «запутанности» атомов

Для повышения точности измерений в квантовых атомных гравиметрах предлагается использование т. н. свойства «запутанности» (или «связанности») холодных атомов, которые одновременно рождены в одной точке пространства. Дело в том, что погрешность измерения фазовых смещений в интерферометрах «фонтанного» типа обратно пропорциональна корню квадратному из количества используемых атомов. При использовании свойства «запутанности» атомов погрешность измерения обратно пропорциональна уже общему количеству используемых атомов. В этом случае флуктуации измеряемой фазы в атомном БЭК-интерферометре снижаются вследствие квантовой корреляции атомов в облаке. В рамках создаваемого Центра предполагается как теоретические, так и экспериментальные исследования, направленные на использование квантового свойства «запутанности» атомов в интересах повышения точности гравиметров.

Квантовые оптические средства гравиметрии

Квантовый оптический интерференционный гравиметр

Этот прибор основан на использовании идеи интерферометрической гравитационно-волновой антенны, предложенной в 1962 г. российскими учеными Герценштейном М. Е. и Пустовойтом В. И. В одном из вариантов реализации в квантовом оптическом интерференционном гравиметре ис-

пользована гибкая мембрана, нагруженная чувствительной массой, а также интерферометр Майкельсона, в каждом из плеч которого находятся резонаторы Фабри-Перо (Давлатов и др., 2017). Под действием силы тяжести пробная масса изгибает мембрану и изменяет длину резонатора интерферометра. Это приводит к смещению интерференционной картины на плоскости фотоприемника. Расчеты показывают, что достижимую чувствительность измерений по сравнению с современными гравиметрами можно значительно снизить. В современной гравитационно-волновой антенне типа LIGO (Пустовойт, 2016) погрешность измерения перемещений чувствительных зеркал значительно меньше (на 5–6 порядков) погрешности современных типовых лазерных интерферометров. Поэтому в рамках Центра ставится задача максимально полного использования в гравиметрии достижений, полученных при создании элементов интерферометрических гравитационно-волновых антенн.

Односпутниковый космический квантовый оптический измеритель гравитационного градиента

Этот прибор основан на использовании свободных масс, движущихся внутри объема спутника, и измерении их относительного движения

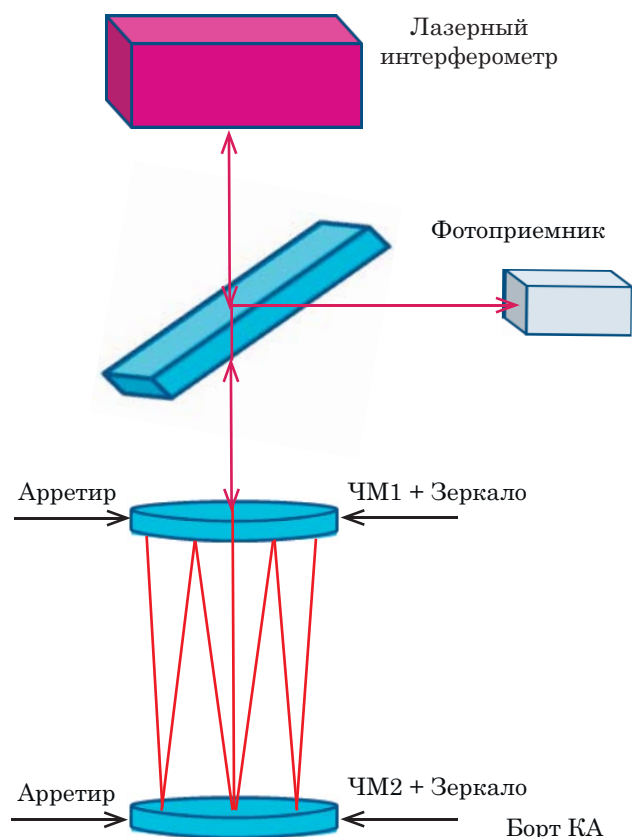


Рис. 4. К пояснению принципа действия односпутникового лазерного градиентометра

с помощью лазерного интерферометра ([Фатеев, Давлатов, 2020](#)). Каждая чувствительная масса связана с оптическим зеркалом, при этом два зеркала образуют интерферометр Фабри-Перо (рис. 4). Габариты прибора не превышают 1 м, дискретность отсчетов 1–10 сек. Теоретическая оценка и экспериментальная проверка показали, что ожидаемая погрешность этого прибора ниже, чем у известного односпутникового зарубежного гравитационного градиентометра GOCE ([Drinkwater, et al. 2007](#)). Для оценки его характеристик во ФГУП «ВНИИФТРИ» создан наземный испытательный стенд. Для испытаний в космосе разработан макет, который предлагается транспортировать на борт проектируемой Российской орбитальной станции. Вариант трехосевого бортового космического лазерного градиентометра защищен патентом РФ.

Как и известный зарубежный прибор этот градиентометр может использоваться для создания высокоточных гравиметрических навигационных карт удаленных территорий и акваторий.

Многоспутниковый кластерный лазерный гравитационный градиентометр

Для повышения точности Арктических навигационно-гравиметрических карт, создаваемых в интересах повышения эффективности поиска полезных ископаемых, а также оснащения гравиметрических САН, рассмотрена возможность использования для этих целей многоспутникового гравиметрического низкоорбитального кластера нано-КА, размещенного на околополярной орбите ([Донченко и др., 2023](#)). Расстояние между спутниками кластера не превышает 100 км, средняя высота околополярных орбит нано-КА кластера составляет 300–400 км, количество наноспутников в кластере не превышает 6–8 штук. В процессе исследования рассмотрено несколько баллистических структур низкоорбитального гравиметрического кластера нано-КА. Бортовые грави-градиентометры в этой системе реализованы на основе бортовой высокоточной лазерной интерферометрической системы, размещенной на ведущем спутнике кластера. На всех ведомых наноспутниках кластера размещаются легкие пассивные отражатели. Это обеспечивает возможность использования до 6–8 ведомых КА для одновременного определения нескольких составляющих пространственных производных потенциала ГПЗ. Оценки, полученные на основе моделирования, показывают, что ожидаемая точность кластерных многоспутниковых лазерных измерений соизмерима с точностью известных зарубежных проектов типа CRACE. Преимущество предлагаемой системы состоит в том, что в ней измеряются все составляющие градиентного тензора, тогда как в GRACE — лишь одна его горизонтальная составляющая. Это

обеспечивает более высокую эффективность уточнения параметров ГПЗ. Реализация этой системы в Центре не вызывает сомнений, поскольку многоспутниковые кластерные системы, а также межспутниковая связь к настоящему времени многократно испытаны как в РФ, так и за рубежом.

Криогенные гравиметры и их применения

Если взять предварительно охлажденный сверхпроводник, а потом поднести к нему мощный магнит, то такой сверхпроводник образует свое собственное магнитное поле, схожее по силе с полем магнита. В результате магнит спокойно левитирует, т. е. парит над сверхпроводником. Данный эксперимент является наглядной демонстрацией эффекта *квантовой левитации*. Положение магнита, имеющего вполне определенный вес, зависит не только от внешнего магнитного поля, но и от величины ускорения свободного падения в данной точке пространства. На этом эффекте созданы весьма чувствительные гравиметры. Положение чувствительной массы, зависящее от ускорения свободного падения, можно контролировать разными способами, например с помощью лазерного интерферометра.

Среди зарубежных производителей криогенных гравиметров следует выделить фирму IGrav™ ([Warburton, et al., 2010](#)). Характеристики криогенного стационарного гравиметра типа iGrav™ представлены на рис. 5.

Как следует из рис. 5а, дрейф «нуля» стационарного зарубежного криогенного гравиметра составляет не более 0.5 мкГал в месяц, а точность измерений, достигнутая в данном приборе, составляет 0.1 нГал (0.0001 мкГал). Принципиально этот прибор может выполнять роль эталона единицы измерения УСП.

На основе двух стационарных криогенных гравиметров рассмотренного типа можно реализовать измерения вторых пространственных производных гравитационного потенциала ГПЗ (рис. 5б). При разносе гравиметров по вертикальной оси OZ измеряется составляющая тензора производных W_{zz} , а при разносе по горизонтальным осям OX, OY — составляющие вторых производных W_{zx} , W_{zy} . Предложенные схемы измерений целесообразно использовать в качестве эталонных измерителей вторых пространственных производных потенциала ГПЗ.

Квантовые магнитометры

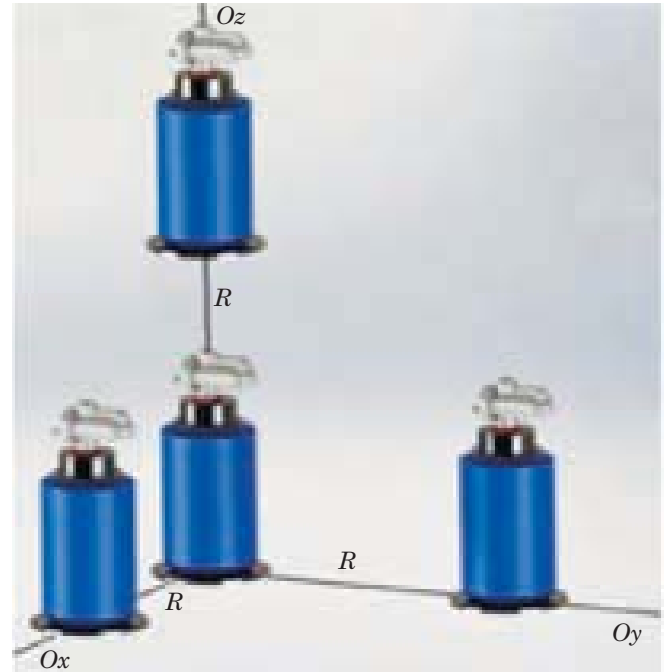
В настоящее время современные квантовые магнитометры стали достаточно компактными. Они используются при всех возможных способах измерений МПЗ: в пешем режиме, с борта воздушных объектов (БПЛА и пилотируемых самолетов), а также с борта морских и космических носи-



Стационарный, погрешность 0.1 нГал

Характеристика	Значение
Дрейф, мкГал/мес	Не более 0.5
Точность измерений, нГал	Не хуже 0.1
Межсервисный интервал, ч	10 000
Замена гелия	Исключена
Область применения	Лабораторные измерения

a)



Достижимая погрешность эталонов:
 – вертикального градиента $\sigma_{zz} = 10^{-4}$ Этвеш;
 – горизонтальных градиентов $\sigma_{zx} = \sigma_{zy} = 10^{-4}$ Этвеш

b)

Рис. 5. Зарубежный криогенный гравиметр iGrav™: а) характеристики гравиметра; б) схемы измерителей вторых пространственных производных

телей. Из существующих квантовых магнитометров следует выделить наиболее востребованные:

— зарубежные квантовые магнитометры с оптической накачкой GSMP-35, GSMP-25 компании GEM Systems (США) ([Квант. магнитометры GSMP-35/25](#));

— российские квантовые магнитометры Geoshark компании ГК «Геоскан» ([Квант. магнитометр Geoshark](#));

— магнитные датчики компании НПП «Радар-ммс» ([Магнитометр. Датчик ДМ](#)).

Все они имеют погрешность менее 1 нТл, массу не более 2 кг и частоту измерений в сотни Гц. На основе малогабаритных магнитометров за рубежом созданы магнитометрические САН летательных аппаратов, при этом в одном из вариантов получена погрешность навигации 42 м ([Gnadt Albert, 2022](#)), в другом — 13 м ([Canciani, 2017](#)).

Дальнейшее повышение точности квантовых магнитометров и уменьшение их массогабаритных характеристик возможно на основе использования модифицированного метода Белла-Блума, основанного на использовании эллиптически поляризованного светового пучка. Это позволит их размещать на миниатюрных БПЛА при создании систем автономной навигации. Такие квантовые магнитометры уже разработаны за рубежом. Их масса

составляет несколько десятков граммов, чувствительность достигает доли пикоТесла.

В России в ИЛФ СО РАН разработан макет такого магнитометра ([Makarov, et al., 2025](#)). В создаваемом во ФГУП «ВНИИФТРИ» Центре квантовых измерений предполагается создание бортового варианта такого магнитометра, пригодного для применения в системах автономной навигации по МПЗ.

Квантовые средства геодезического обеспечения систем навигации

Наземные квантовые нивелиры

Существующая система высот страны основана на Балтийской системе высот, отсчитываемой от Кронштадтского футштока. Однако на расстояниях в несколько тысяч километров от него при использовании традиционных лазерных средств нивелирования погрешность определения разности высот недопустимо большая. Квантовые нивелиры предназначены для обеспечения высокой точности геодезического нивелирования на глобальных расстояниях. В квантовом нивелире измеряется разность гравитационных потенциалов, которой однозначно соответствует разность ортометрических высот точек на поверхности Земли ([Фатеев и др., 2024](#)). Комплекс средств квантового

нивелира включает разнесенные в пространстве высокостабильные СЧВ, или квантовые часы, а также системы дистанционного сравнения их шкал времени или сличения частот их задающих генераторов. Квантовые нивелиры могут быть использованы для создания высокоточной геодезической высотной основы больших территорий.

Физическими эффектами, измеряемыми в квантовом нивелире, являются эффекты гравитационного смещения частоты и гравитационного замедления времени. Они непосредственно связаны с разностью гравитационных потенциалов и разностью ортометрических высот. Измерение этих эффектов выполняется с помощью двух СЧВ, размещенных в разных точках гравитационного поля. При относительной нестабильности ОСЧ 10^{-17} погрешность определения разности ортометрических высот составляет 10 см. Такая точность измерений разности высот точек, разнесенных на тысячи километров, современным методам нивелирования недоступна. Во ФГУП «ВНИИФТРИ» созданы и испытаны несколько макетов квантовых нивелиров на основе водородных квантовых часов (рис. 6). Подробное описание переменных, значения которых даны на рис. 6, 7, приведено в публикации (Фатеев и др., 2025).

В качестве опорного СЧВ во всех макетах использовался высокостабильный СЧВ государственного эталона ГЭТ 1, а измерительные кван-

товые часы размещались на различных удаленных объектах: в Нижнем Архызе (объект «Кавказ») с разностью ортометрических высот $\Delta H_{орт} = +1804$ м; в Иркутске при разности ортометрических высот около 500 м, в Евпатории (разность ортометрических высот минус 200 м), а также на территории ФГУП «ВНИИФТРИ» в эксперименте «Дуплекс» с разностью высот около +20 м. Во время измерений, которые для накопления гравитационного эффекта продолжались около 5 суток, для сравнения шкал времени и сличения частот квантовых водородных часов использовались сигналы ГНСС (рис. 2), система дуплексной связи через геостационарный спутник «Экспресс-80», а также метод релятивистской синхронизации. Во всех проведенных экспериментах измерения разности ортометрических высот водородных СЧВ экспериментально подтвердились с ожидаемой точностью. За рубежом аналогичные измерения разности высот по дуплексной схеме через геостационарный спутник проведены в Китае (Peng Cheng, 2022).

Для обеспечения глобального действия квантового нивелира авторами предложено размещение высокостабильного измерительного СЧВ на борту КА. Наилучшее решение основано на использовании проектируемой Российской орбитальной станции (Фатеев и др., 2024, стр. 238).

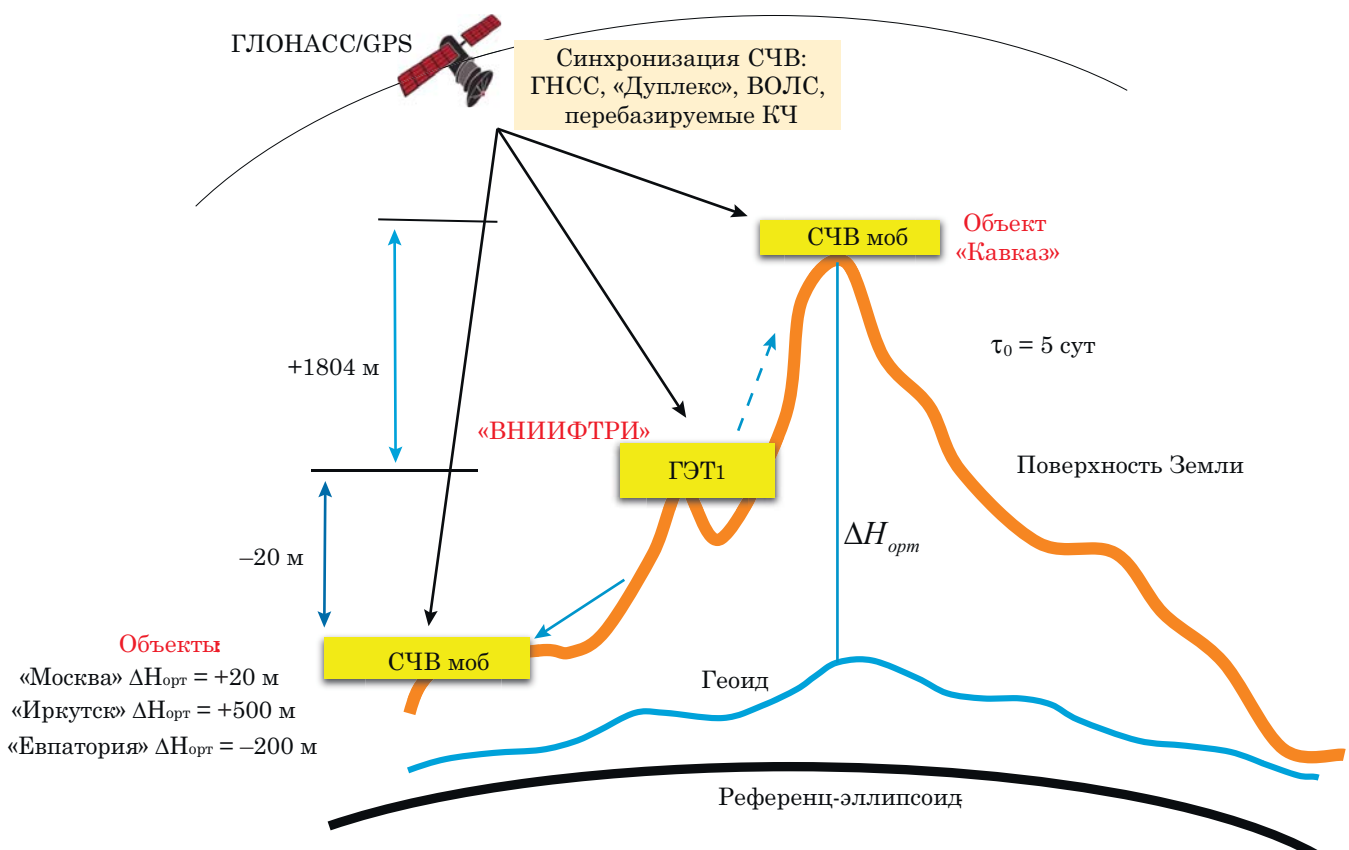


Рис. 6. К пояснению принципа действия квантовых нивелиров

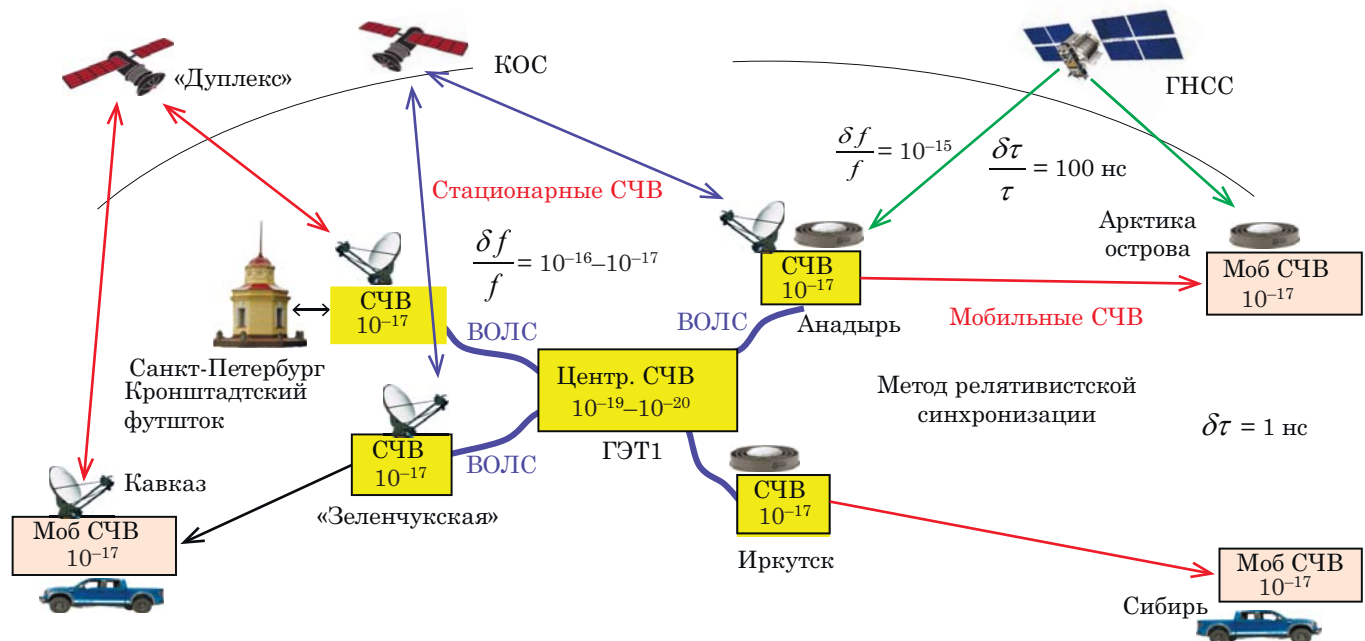


Рис. 7. Нивелирная сеть страны «Квантовый футшток» на основе высокостабильных СЧВ

При этом бортовой СЧВ должен быть носителем наземной шкалы времени (как в ГЛОНАСС). Если для сравнения шкал времени космического СЧВ и наземного СЧВ использовать КОС типа «Точка», то такой квантовый нивелир способен обеспечить измерение разности ортометрических высот между ГЭТ 1 и любой точкой на поверхности Земли, где есть измерительная КОС.

Нивелирная сеть «Квантовый футшток»

На основе создаваемых высокостабильных микроволновых и оптических квантовых нивелиров авторами предлагается создание перспективной нивелирной сети «Квантовый футшток» (рис. 7). Главной задачей сети является создание и поддержание единой высотной основы на территории страны, включая Арктику, с погрешностью единицы — десятки сантиметров.

Сеть «Квантовый футшток» основана на использовании Центрального СЧВ, в качестве которого выступает ядерный СЧ. Центральный СЧВ предлагается назвать «Квантовый футшток», по аналогии с Кронштадским футштоком в системе классических нивелиров. Относительно Квантового футштока ведется отсчет начальных ортометрических значений высот, а также изменений высот во всей сети квантовых нивелиров.

Кроме того, в сети используются региональные высокостабильные СЧВ, мобильные СЧВ, а также системы сличения времени и частоты (синхронизации и синтонизации) между ними. При этом реализуются различные рассмотренные выше схемы квантовых нивелиров (рис. 2 и 6).

Задачей Центра является поэтапная реализация сети на основе имеющихся удаленных СЧВ, а также линий связи между ними. Наилучшим образом для континентальной части сети подходят ВОЛС, в то время как Арктике их реализация затруднена. Поэтому для ортометрической высотной привязки арктических островов с необходимой точностью целесообразно использовать метод релятивистской синхронизации на основе мобильных квантовых часов.

За рубежом, в частности, в Европе, уже создаются наземные сети мониторинга разности гравитационных потенциалов на основе ОСЧ с нестабильностью 10^{-17} – 10^{-18} на основе применения ВОЛС. В Проекте Международной геодезической системы GGOS по подобной схеме предполагается создавать Международную систему отсчета высот IHRF с погрешностью определения разности высот 1 мм.

Заключение

В связи с поручением Заместителя Председателя Правительства Российской Федерации, Министра промышленности и торговли Российской Федерации, Д. В. Мантурова от 06.05.2024 г. о создании во ФГУП «ВНИИФТРИ» «Центра квантовых измерений» в статье рассмотрены главные цели создания Центра и раскрыто его предназначение.

Центр предназначен для достижения нового уровня тактико-технических характеристик национальной шкалы времени UTC (SU), обеспечения развития средств фундаментального обеспечения ГЛОНАСС в рамках Федерального проекта

«Навигация и время», а также для создания систем автономной навигации, основанных на измерениях параметров ГПЗ и МПЗ.

Главные цели, достигаемые при создании Центра, заключаются в создании единого эталона частоты, времени, длины и гравиметрии; в разработке более совершенных высокостабильных стационарных и мобильных стандартов частоты и времени, а также в разработке квантовых навигационных датчиков параметров ГПЗ и МПЗ.

При рассмотрении единого эталона рассмотрено влияние гравитационного поля Земли на эталонную частоту, время и длину. При этом показано, что при создании вторичных эталонов необходимо знать координаты и скорость движения точки установки вторичного эталона с весьма высокой точностью.

Рассмотрена возможность создания следующего поколения квантовых гравиметрических эталонов. В настоящее время в РФ создан лишь один гравиметрический эталон: Государственный первичный специальный эталон единицы ускорения в гравиметрии. Предложено создание в рамках Центра: 1) эталона единицы разности гравитационных потенциалов; 2) эталона единицы отклонения отвесной линии на основе астроизмерителя УОЛ; 3) эталонов единиц вертикальных и горизонтальных пространственных производных гравитационного потенциала на основе криогенных гравиметров. Характеристики вторичных гравиметрических эталонов, как и эталонов частоты — времени, также зависят от координат точки измерения в гравитационном поле.

Рассмотрены пути развития высокостабильных СЧВ и перспективы создания высокоточных систем сравнения шкал времени и сличения частот разнесенных СЧВ. При этом отмечено, что главной проблемой в этой области становится создание ядерных СЧВ и методов сличения их частот.

Рассмотрены проблемы создания сверхточных квантовых навигационных датчиков параметров ГПЗ и МПЗ. При этом отмечено, что решение этой проблемы основано на использовании достижений физики последних лет: интерферометрии на волнах де Бройля, интерферометрических лазерных гравитационно-волновых антенн, а также на создании сверхстабильных стандартов частоты и времени.

При этом проанализированы проблемы создания и возможности квантовых атомных гравиметров «фонтанного» типа, а также гравиметров на Бозе — Эйнштейна конденсате с использованием т.н. состояний «запутанности» холодных атомов. Изучены возможности создания высокоточных квантовых оптических датчиков ГПЗ: наземных гравиметров, а также космических односпутнико-

вых и многоспутниковых (кластерных) измерителей параметров ГПЗ.

Проанализированы возможности криогенных гравиметров и градиентометров на их основе. Показано, что они обеспечивают наивысшую точность среди известных измерителей. Рассмотрены возможности малогабаритных квантовых магнитометров, на основе которых могут быть созданы САН по МПЗ.

Достаточно подробно представлены перспективы создания квантовых нивелиров на основе высокостабильных СЧВ, а также геодезическая сеть страны «Квантовый футшток». Сеть обеспечивает создание новой высотной основы страны. При этом для реализации ее возможностей в качестве Центрального СЧВ предлагается использовать ядерный стандарт частоты.

В целом, создаваемые в рамках «Центра квантовых измерений» новые квантовые средства предназначены для повышения уровня отечественной метрологической базы, для развития высокоточных средств глобального геодезического обеспечения, а также для создания новых систем автономной навигации, которые не подвержены воздействию радиоэлектронных помех.

Литература

- Давлатов Р. А., Пустовойт В. И., Фатеев В. Ф. Лазерные гравиметры на основе интерферометра Фабри-Перо // Физические основы приборостроения. 2017. Т. 6, № 3 (25). С. 63–71.
- Донченко С. С., Давлатов Р. А., Фатеев В. Ф. Межспутниковый лазерный гравитационный градиентометр на основе кластера малоразмерных космических аппаратов // Известия высших учебных заведений. «Геодезия и Аэрофотосъемка». 2023. Т. 67, вып. № 3. С. 6–15.
- Квантовые магнитометры GSMP-35/25 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gemsys.ca/uav-magnetometers/> (дата обращения 21.05.2025).
- Квантовый магнитометр Geoshark [Электронный ресурс]. URL: https://www.geoscan.ru/ru/services/aeromagnetic_survey (дата обращения 21.05.2025).
- Магнитометрический датчик ДМ [Электронный ресурс]. URL: <https://propriory.ru/static/upl/01-08-2024/XxBTTbHpZhPwHMyC/cszl5troijc3o2hr1ygtt23uu9dzmtm1.pdf> (дата обращения 21.05.2025).
- Норец И. Б., Карауш А. А., Купалов Д. С. и др. Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2022: вклад в формирование шкалы всемирного координированного времени // Измерительная техника. 2023. № 10. С. 4–9.
- Пустовойт В. И. О непосредственном обнаружении гравитационных волн // УФН. 2016. Т. 186. № 10. С. 1–20.
- Скворцов М. Н., Игнатович С. М., Вишняков В. И. и др. Миниатюрный квантовый стандарт частоты на основе явления когерентного пленения населённости в парах атомов ^{87}Rb // Квантовая электроника. 2020. Т. 50. № 6. С. 576–580.

Фатеев В. Ф. Релятивистская метрология околоземного пространства-времени и ее практические приложения // *Астрономический журнал*. 2018. Т. 5, № 12. С. 1–6.

Фатеев В. Ф. Релятивистские эффекты в спутниковых квантовых часах на эллиптических орбитах глобальных навигационных спутниковых систем // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2023. Т. 10, вып. 2. С. 1–10.

Фатеев В. Ф., Давлатов Р. А. Анализ возможностей космического градиентометра на свободных массах // *Альманах современной метрологии*. 2020. № 2 (22). С. 65–72.

Фатеев В. Ф., Денисенко О. В., Каверин А. М. и др. Концепция создания и применения помехозащищенных систем автономной навигации по геофизическим полям // *Труды ИПА РАН*. 2025. Вып 74. С. 42–56.

Фатеев В. Ф., Рыбаков Е. А., Смирнов Ф. Р. и др. Квантовый нивелир и сеть «Квантовый футшток». Теория, эксперименты, макетирование. Монография / Под ред. профессора Фатеева В.Ф. Изд. ФГУП «ВНИИФТРИ». 2024. 344 с.

Федорова Д. М., Балаев Р. И., Курчанов А. Ф. и др. Передача эталонных радиочастот по волоконно-оптической линии с электронной компенсацией возмущений // *Измерительная техника*. 2015. № 9. С. 34–37.

Хабарова К. Ю., Вишнякова Г. А., Кудяров К. В., Колачевский Н. Н. Передача сигналов частоты по оптоволоконным линиям связи с использованием фазы несущей // *Метрология времени и пространства. Материалы VIII Международного симпозиума, 14–16 сентября, 2016. Санкт-Петербург, Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2016. С. 69–70.*

Böhi P., Riedel M. F., Hoffrogge J., et al. *Nature Phys.* 2009. No. 5. P. 592.

Canciani A. J., Raquet J. F. Airborne magnetic anomaly navigation // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2017. Vol. 53, no. 1. P. 67–80.

Drinkwater M., Haagmans R., Muzi D., et al. The GOCE gravity mission: ESA's first core earth explorer // *Proceedings of the 3rd International GOCE User Workshop, 6–8 November, 2006. Frascati, Italy: ESA Special Publication, SP-627, 2007. P. 1–8.*

Gnadt A. machine learning-enhanced magnetic calibration for airborne magnetic anomaly navigation. 2022. doi: 10.2514/6.2022-1760.

Jo G.-B., Shin Y., Will S., Pasquini T. A., et al. *Phys. Rev. Lett.* 2007. Vol. 98, 030407.

Makarov A., Kozlova K., Brazhnikov D., et al. All-optical atomic magnetometry using an elliptically polarized amplitude-modulated light wave // *Optics Communications*. 2025. Vol. 577. 131369. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2024.131369> (дата обращения 21.05.2025).

Polyakov V., Timofeev Y., Demidov N. Frequency stability improvement of an active hydrogen maser with a single-state selection system // *Joint conference of the european frequency and time forum and IEEE international frequency control symposium, 7–17 July 2021. Gainesville, FL, USA, EFTF/IFCS, 2021, Proceedings Virtual.*

Peng Cheng, Wenbin Shen, Xiao Sun, et al. Measuring height difference using two-way satellite time and frequency transfer // *Remote Sens.* 2022. 14. P. 451. URL: <https://doi.org/10.3390/rs14030451> (дата обращения 21.05.2025).

Warburton R. J., Pillai H., Reinman R. C. Initial results with the new GWR iGravtm superconducting gravity meter. Published in International Association of Geodesy (IAG) Symposium Proceedings IAG SYMPOSIUM on TERRESTRIAL GRAVIMETRY: STATIC and MOBILE MEASUREMENTS (TG-SMM2010) 22–25 June 2010, Russia, Saint Petersburg.