

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ СРАВНЕНИЯ ЧАСТОТ ТЕРРИТОРИАЛЬНО УДАЛЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

*А. В. Семенко**, *А. А. Карауш*, *Д. М. Федорова*, *А. Н. Малимон*, *Д. В. Сутырин*,
С. Н. Слюсарев, *В. Н. Федотов*, *С. И. Донченко*

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»)
141570, Менделеево, Московская обл., Россия*

Поступила в редакцию 12 марта 2024 г.,
после переработки 12 марта 2024 г.
Принята к публикации 8 апреля 2024 г.

Рассматриваются работы для будущего переопределения секунды на основе квантового перехода в оптическом диапазоне. Уточнен бюджет неопределенности оптического стандарта частоты Sr-1 на основе ультрахолодных атомов стронция, включенного в состав Государственного первичного эталона времени и частоты. Излагается описание различных способов сравнения частот удаленных оптических стандартов частоты для реализации «дорожной карты», принятой на XXVII Генеральной конференции мер и весов. Перечислены точностные характеристики, предельно достижимые при использовании описанных способов, проводится их сравнение.

Статья представлена в рамках публикации материалов конференции «Физика ультрахолодных атомов» (ФУХА-2023), Новосибирск, декабрь 2023 г.

DOI: 10.31857/S0044451024100043

1. ВВЕДЕНИЕ

Стандарты частоты являются важнейшим инструментом для определения единицы времени — секунды. На данный момент действующее определение секунды в системе СИ основано на микроволновом сверхтонком переходе в атомах цезия ^{133}Cs [1]. Цезиевый фонтан и ансамбль водородных мазеров — хранителей времени и частоты, входящих в состав ГЭТ-1 — Государственного первичного эталона времени и частоты (ГЭВЧ), участвует в формировании национальной и международной шкалы времени. Атомные часы на основе цезиевых фонтанов достигли уровня неопределенности воспроизведения единицы частоты $2.3 \cdot 10^{-16}$ [2], и существуют ограничения, не позволяющие значительно улучшить их точностные характеристики. В настоящее время оптические стандарты частоты (ОСЧ), использующие в качестве опорных оптические пе-

реходы в атомах или ионах, превзошли в части стабильности и неопределенности воспроизведения частоты лучшие микроволновые стандарты. Основным преимуществом ОСЧ перед микроволновыми стандартами является более высокая частота «часовых» переходов и более узкая ширина их спектральной линии.

Перспективность ОСЧ подтверждена результатами исследований метрологических институтов, в том числе российских. Лучшие ОСЧ достигли неопределенности воспроизведения частоты на уровне $1 \cdot 10^{-18}$ [3], и существуют возможности для дальнейшего улучшения данного показателя. Этим объясняется стремление метрологического сообщества, которое представлено, в первую очередь, национальными метрологическими институтами, к принятию нового определения секунды на основе оптического перехода. Согласно резолюции, принятой в 2022 г. на 27-й Генеральной конференции мер и весов, к 2030 г. должно быть дано новое определение секунды на основе эталонного квантового перехода в оптическом диапазоне [4].

* E-mail: av_semenko@mail.ru

Современные ОСЧ обладают высокими точностными характеристиками, но их практическое применение часто затруднено малым временем их непрерывной работы (от нескольких часов до нескольких суток), сложностью выполнения сравнений частот удаленных друг от друга лабораторных ОСЧ из-за невозможности их транспортировки и особенностей распространения их излучения в каналах связи. Консультативный комитет по времени и частоте (ССТФ) рекомендовал «дорожную карту» — ряд практических шагов, которые необходимы для переопределения секунды [4]. Согласно дорожной карте, необходимо как уточнить и улучшить характеристики нестабильности и неопределенности существующих ОСЧ, так и обеспечить возможность высокоточного сравнения частот территориально удаленных ОСЧ, в том числе в континентальном и межконтинентальном масштабах. Исследования, направленные на улучшение характеристик существующих ОСЧ и создание более точных методов сравнения частот между территориально удаленными ОСЧ, актуальны для реализации нового определения секунды. Также они будут необходимы для формирования улучшенных, т. е. более точных, шкал ТАИ (Международная шкала атомного времени) и UTC (Всемирное координированное время). Реализовать удаленные сравнения частот возможно, совершенствуя методы передачи высокостабильного оптического излучения по компенсированным волоконно-оптическим линиям, применяя транспортируемые ОСЧ и развивая методы сравнений, использующие сигналы глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС).

Сличение эталонов в первую очередь необходимо для формирования шкалы ТАИ, основанной на секунде СИ, и шкалы времени UTC. Отметим, что шкала времени ТАИ и шкала UTC формируются Международным бюро мер и весов (МБМВ) на базе данных об атомных часах и их взаимных сличениях, получаемых от сотрудничающих национальных метрологических лабораторий. В настоящее время в мире функционирует около десяти первичных стандартов частоты на основе фонтана атомов цезия. Только шесть лабораторий, в том числе и ВНИИФТРИ, регулярно предоставляют результаты своих измерений в МБМВ, на основе которых МБМВ устанавливает и поддерживает шкалу времени ТАИ [5].

Во ВНИИФТРИ был разработан ОСЧ на основе ультрахолодных атомов стронция (ОСЧ Sr-1), и с 2018 г. он включен в состав ГЭТ-1. Его неисключенная систематическая погрешность (НСП) не хуже $1 \cdot 10^{-16}$. В 2022 г. в состав ГЭТ-1 вошли ОСЧ Sr-2

и Sr-3 с улучшенной НСП до $1 \cdot 10^{-17}$ за счет уменьшения излучения черного тела. В настоящий момент ОСЧ Sr-1 используется для реализации национальной шкалы времени в тестовом режиме [6]. Также ведутся разработки перебазируемого ОСЧ (ПОСЧ) на основе ультрахолодных атомов Yb [7] и поиск путей уменьшения массогабаритных характеристик такого стандарта [8].

В настоящей работе проведено уточнение наиболее значимых составляющих бюджета неопределенности ОСЧ Sr-1, входящего в состав ГЭТ-1. Также кратко представлен аванпроект перебазируемого ОСЧ на ультрахолодных нейтральных атомах и рассмотрены способы, с помощью которых можно сравнивать частоты ОСЧ с другими территориально удаленными стандартами частоты.

2. УТОЧНЕНИЕ БЮДЖЕТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ОСЧ SR-1, ВХОДЯЩЕГО В СОСТАВ ГЭТ-1

Бюджет неопределенности ОСЧ формируют несколько эффектов, которые вносят значительный вклад в НСП оценки сдвига частоты стандарта относительно невозмущенного квантового перехода. Наибольшее влияние на частоту ОСЧ на нейтральных атомах Sr и Yb имеют излучение черного тела, излучение лазера формирующего оптическую решетку (ЛФОР) и эффект Зеемана, вызванный влиянием магнитного поля. Существуют и другие сдвиги, влияние которых на частоту ОСЧ значительно меньше. К таким сдвигам относятся, например, сдвиг, зависящий от плотности атомов в оптической решетке, динамический штарковский сдвиг, сдвиг Доплера второго порядка и другие. Связанная с ними поправка находится на уровне единиц 10^{-17} – 10^{-18} знака. В то же время паспортное значение неопределенности для ОСЧ на атомах стронция определено на уровне $1 \cdot 10^{-16}$, и первые три обозначенных сдвига вносят в нее наибольший вклад. По этой причине их НСП должна быть оценена в первую очередь. Метод и результаты оценки представлены ниже.

2.1. Оценка вклада в НСП сдвига, вызванного излучением черного тела

Основными источниками теплового излучения в ОСЧ на основе ультрахолодных атомов Sr-1 являются магнитные катушки, по которым протекает электрический ток, магнитная секция зеемановского замедлителя, тепловое излучение в инфракрасном диапазоне, проходящее через окна вакуум-

ной камеры, и источник горячих атомов стронция, представляющий собой нагреваемую до температур 450 °С печь с отверстием диаметром 5 мм, расположенную на расстоянии 700 мм от атомов.

Влияние различных источников теплового излучения зависит от эффективной температуры, выраженной через эффективный телесный угол окружающих поверхностей [9]. Атомы в центре вакуумной камеры воспринимают тепловое излучение пропорционально доле эффективного телесного угла. В нашем случае самое малое влияние оказывают окна вакуумной камеры, пропускание которых в инфракрасном диапазоне мало (около 1.5 %). В вакуумной камере ОСЧ Sr находятся 11 окон толщиной 3.3 мм и площадью 1662 мм² и 2 окна толщиной 2.5 мм и площадью 254 мм², и доля их телесного угла мала (в сумме она составляет примерно 9 %). Источник горячих атомов Sr располагается на большом расстоянии от облака охлажденных атомов. Доля телесного угла теплового излучения, распространяющегося от него до центра вакуумной камеры, незначительна (около 0.002 %). Таким образом, доминирующим источником теплового излучения являются стенки вакуумной камеры, нагреваемые магнитными катушками. Они воздействуют на большую область вакуумной камеры в непосредственной близости от облака атомов. Доля телесного угла, воспринимаемая атомами от поверхностей вакуумной камеры, составляет примерно 91 %.

Как показали измерения с помощью термодатчиков, температура вакуумной камеры распределяется практически равномерно и в среднем составляет 23 °С. Для более точного знания температуры вакуумной камеры и расчета сдвига излучения черного тела (ИЧТ) и его НСП в дальнейшем планируется расположить 10 датчиков внутри и вне вакуумной камеры спектроскопа, но для предварительной оценки сдвига, вызванного ИЧТ, имеющихся данных достаточно.

Для расчета сдвига ИЧТ в ОСЧ регистрируется температура вакуумной камеры T_{vac} на расстоянии около 70 мм от облака ультрахолодных атомов. Средняя температура вакуумной камеры за время измерений составила 292.2 К. Зная среднюю температуру, можно рассчитать сдвиг, вызванный влиянием ИЧТ, по формуле, представленной в статье [10] и с использованием значений динамической и статической поляризуемостей из статей [10–13]. Таким образом, уравнение расчета сдвига ИЧТ (black

body radiation, BBR) приводится к виду

$$\nu_{BBR} = -2.13023(6)\Gamma_{\text{ц}} \left(\frac{T}{300 \text{ К}} \right)^4 - 0.14877(7)\Gamma_{\text{ц}} \left(\frac{T}{300 \text{ К}} \right)^6. \quad (1)$$

На основании полученных данных о температуре вакуумной камеры вычисляется среднее значение температуры $T_{vac} = 292.2$ К. Главным источником неопределенности при оценке сдвига ИЧТ являются флуктуации температуры вакуумной камеры от цикла к циклу и отсутствие точной информации об инфракрасном излучении, распространяющемся через окна вакуумной камеры. Для вычисления НСП измерений температура вакуумной камеры фиксировалась каждые 2 ч в течение одного рабочего дня. На основании данных об измерениях температуры вычислялась неопределенность типа А, связанная со случайными изменениями условий выполнения эксперимента:

$$u_{A,BBR} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \overline{T_{vac}})^2}{N(N-1)}}, \quad (2)$$

где T_i — i -е измерение температуры, $\overline{T_{vac}}$ — среднее значение температуры, N — число измерений. Неопределенность по типу В вычисляется по формуле

$$u_{B,BBR} = \frac{\Delta_s}{\sqrt{3}}, \quad (3)$$

где Δ_s — погрешность измерения датчика температуры ТН-485, которая составляет не более 0.1 °С в диапазоне измерений от –200 до 60 °С.

Суммарная стандартная неопределенность измерений сдвига частоты, вызванного ИЧТ, вычисляется по формуле

$$u_{C,BBR} = \sqrt{u_{A,BBR}^2 + u_{B,BBR}^2}. \quad (4)$$

Расширенная неопределенность измерений при коэффициенте охвата $k = 2$ рассчитывалась по формуле

$$U_{BBR} = k u_{C,BBR}. \quad (5)$$

Неопределенность типа А составила ± 0.282 К, неопределенность типа В, связанная с погрешностью датчика температуры, — ± 0.057 К. Неопреде-

ленность косвенных измерений для сдвига частоты, вызванного ИЧТ, определялась по формуле

$$\begin{aligned} \sigma_{BRR} &= \sqrt{\left(\frac{\delta\nu_{BRR}}{\delta T_{vac}}\right)^2 U_{BRR}^2} = \\ &= \sqrt{\left(-2.1302 \cdot 4 \frac{T_{vac}^{-3}}{300^4} - 0.1487 \cdot 6 \frac{T_{vac}^{-5}}{300^6}\right)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, относительная неопределенность оценки сдвига частоты, вызванного ИЧТ, составляет $2.03 \cdot 10^{-17}$.

2.2. Оценка составляющей НСП сдвига частоты из-за квадратичного эффекта Зеемана

Зеемановский сдвиг в атомах Sr возникает из-за взаимодействия атомов с внешним магнитным полем, которое вызывает сдвиг между основным и возбужденным состояниями и приводит к смещению частоты «часового» перехода. Зеемановский сдвиг первого порядка зависит от магнитного квантового числа m_F и величины магнитного поля B , однако в ОСЧ Sr при точном контроле магнитного поля и использовании перекачивающих лазеров зеемановский сдвиг первого порядка может быть исключен, и влияние на атомы в оптической решетке будет оказывать только зеемановский сдвиг второго порядка, пропорциональный B^2 :

$$\Delta\nu_Z = \beta|B|^2 \quad (7)$$

где β — коэффициент зеемановского сдвига, теоретический расчет которого был проведен в работе [14] и составляет $\beta = -0.233$ Гц/Гс².

Таким образом, для определения величины зеемановского сдвига в ОСЧ на основе ультрахолодных атомов Sr необходимо знать значение магнитного поля в месте взаимодействия с атомами (т.е. в центре вакуумной камеры), прикладываемого для расщепления уровня 3P_0 на подуровни $\pm 9/2$.

При сканировании «часового» перехода для подуровней $\pm 9/2$ разница между частотами этих подуровней связана с приложенным постоянным магнитным полем следующим выражением [15]:

$$\Delta\nu_{\pm 9/2} = \frac{9\Delta g \mu_B B}{h} \Rightarrow B = \frac{\Delta\nu_{\pm 9/2} h}{9\Delta g \mu_B}, \quad (8)$$

где μ_B — магнетрон Бора, h — постоянная Планка, $\Delta g = 2.77(3) \cdot 10^{-5}$ — дифференциальный g -фактор между состояниями 3P_0 и 1S_0 [16].

Для оценки зеемановского сдвига сканируется «часовой» переход и вычисляется среднее значение разницы частот между подуровнями $+9/2$ и $-9/2$. Далее вычисляется магнитное поле B по формуле (8). Было определено, что средняя частотная разница между подуровнями $+9/2$ и $-9/2$ в ОСЧ Sr составила 1002.3 Гц. Это говорит о том, что при спектральном анализе прикладывается малое магнитное поле величиной $B = 1.02$ Гс.

Неопределенность типа А, связанная с флуктуациями магнитного поля в момент проведения спектральных исследований, вычислялась путем фиксирования значения разности между подуровнями $+9/2$ и $-9/2$:

$$U_{A,\pm 9/2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta\nu_{\pm 9/2,i} - \overline{\Delta\nu_{\pm 9/2,i}})^2}{N(N-1)}}, \quad (9)$$

где $\Delta\nu_{\pm 9/2,i}$ — i -е измерение частотной разницы между подуровнями $\pm 9/2$, $\overline{\Delta\nu_{\pm 9/2,i}}$ — среднее значение данной частотной разницы. Неопределенность по типу В вычисляется по формуле

$$U_{B,\pm 9/2} = \frac{\Delta_{fc}}{\sqrt{3}}, \quad (10)$$

где Δ_{fc} — погрешность частотомера, составляющая $2 \cdot 10^{-7}$. Суммарная стандартная неопределенность и расширенная неопределенность $U_{\pm 9/2}$ вычислялись аналогично неопределенностям для сдвига, вызванного ИЧТ. Неопределенность σ_B косвенных измерений магнитного поля B определялась по формуле

$$\sigma_B = \sqrt{\left(\frac{\delta B}{\delta\nu_{\pm 9/2}}\right)^2 U_{\pm 9/2}^2} = \sqrt{\left(\frac{h}{9\Delta g \mu_B}\right)^2 U_{\pm 9/2}^2}. \quad (11)$$

Тогда неопределенность σ_Z косвенных измерений сдвига частоты, вызванного эффектом Зеемана, равна

$$\sigma_Z = \sqrt{\left(\frac{\delta\Delta\nu_Z}{\delta B}\right)^2 \sigma_B^2} = \sqrt{(2\beta B)^2 \sigma_B^2}. \quad (12)$$

Проведенные оценки показали, что неопределенность типа А составила ± 2.807 Гц, неопределенность типа В, вызванная погрешностью частотомера, составляет ± 0.000116 Гц. Таким образом, относительная НСП определения зеемановского сдвига составила $\pm 3.18 \cdot 10^{-18}$.

2.3. Оценка составляющей НСП динамического штарковского сдвига частоты

Смещение резонансной частоты «часового» перехода в оптической решетке связано с динамиче-

ским штарковским сдвигом, возникающим вследствие присутствия удерживающего оптического потенциала. Оптическая решетка представляет собой стоячую волну, образованную двумя лазерными лучами (прямым и отраженным), в потенциальные ямы которой загружаются охлажденные атомы. Стоячая волна создается лазером с высокой мощностью излучения. Лазерный пучок с помощью линзы фокусируется так, чтобы добиться минимально возможного радиуса перетяжки (самое узкое место сфокусированного лазерного пучка) излучения в области взаимодействия излучения ЛФОР с охлажденными атомами, и отражается зеркалом в обратном направлении без изменения поляризации излучения.

В ОСЧ Sr-1 ЛФОР стабилизируется с помощью волномера Angstrom WS U2, погрешность привязки которого составляет ± 2 МГц. Для того чтобы удержать атомы в потенциальных ямах стоячей волны, глубина потенциальной ямы оптической решетки должна быть больше, чем энергия теплового движение атомов, охлажденных в магнитооптических ловушках (МОЛ). Используя выражение для глубины потенциальной ямы одномерной оптической решетки [16] и выразив ее через частоту ν_z продольной боковой полосы, получаем

$$U = \frac{\nu_z M^2 \lambda^4}{h^2} E_r, \quad (13)$$

где M — масса атома, λ — длина волны излучения, $E_r = 3.47$ кГц — энергия отдачи фотона [17].

Для определения величины ν_z необходимо провести спектральные исследования с помощью «часового» лазера в широком диапазоне и определить значение частоты боковой полосы, вызванной колебаниями атомов в оптической решетке. Зная частоту ν_z , можно определить глубину U удерживающего потенциала потенциальной ямы стоячей волны оптической решетки по формуле (13).

В работе [17] было показано, что глубина удерживающего потенциала оптической решетки также может быть вычислена в рамках дипольного приближения через поляризуемости «часовых» уровней и интенсивность излучения:

$$U = \frac{\alpha_{e(g)}(\omega_m) I}{E_r}, \quad (14)$$

где α_e и α_g — электродипольные динамические поляризуемости основного и возбужденного состояний соответственно, I — интенсивность излучения ЛФОР в месте взаимодействия с атомами. На «магической» длине волны («магической» частоте ω_m)

поляризуемость атома Sr равняется 241.3 ат. ед. или 42.2 кГц/(кВт · см⁻²) [18]. Интенсивность излучения определяется по формуле

$$I = \frac{2P}{\pi w_0^2}, \quad (15)$$

где P — мощность излучения, w_0 — диаметр перетяжки лазерного пучка в месте взаимодействия с атомами. Следовательно, измерив мощность излучения ЛФОР и вычислив глубину удерживающего потенциала оптической решетки по формулам (13)–(15), можно рассчитать диаметр перетяжки:

$$w_0 = \sqrt{\frac{2P\alpha_{e(g)}(\omega_m)}{\pi U E_r}}. \quad (16)$$

Зная диаметр перетяжки лазерного пучка ЛФОР, легко вычислить его интенсивность по формулам (15), (16). Частотный сдвиг, вызванный спектром излучения ЛФОР, может быть рассчитан с помощью интеграла по формуле [18]

$$\nu_L = - \int_0^{\infty} \Delta\alpha(\omega) I(\omega) d(\omega), \quad (17)$$

где $\Delta\alpha(\omega) = \alpha_e(\omega) - \alpha_g(\omega)$, $I(\omega)$ — спектральное распределение интенсивности излучения ЛФОР. Так как спектр усиленного спонтанного излучения был отфильтрован с помощью одномодового оптического волокна, спектр излучения ЛФОР представляет собой узкую спектральную линию. Неопределенность измерения сдвига ЛФОР может быть оценена как произведение интенсивности излучения ЛФОР и разности электродипольных динамических поляризуемостей при максимальном отклонении излучения ЛФОР от магической длины волны. В нашем случае максимальное отклонение от магической длины волны равно погрешности волномера.

Динамические поляризуемости были определены в работе [17]. Вблизи магической длины волны их разность изменяется по линейному закону, что позволяет использовать для расчета сдвига, вызванного ЛФОР, коэффициент наклона прямой.

Погрешность привязки волномера ведет к тому, что значение разницы динамических поляризуемостей на максимальном отклонении от магической длины волны составляет $\pm 2.242 \cdot 10^{-6}$ ат. ед. или $\pm 4.205 \cdot 10^{-7}$ кГц/(кВт · см⁻²).

Вычислялась стандартная неопределенность по типу А, вызванная случайными флуктуациями измерения ν_z . Она составила 0.4 кГц. Неопределенность по типу В также связана с погрешностью частотомера и составляет $6 \cdot 10^{-6}$ кГц.

Также учитывалось влияние неопределенности измерения мощности излучения P . Стандартная неопределенность по типу А измерения мощности излучения P составила $u_{AP} = 0.34$ мВт, неопределенность по типу В, связанная с погрешностью измерителя мощности ($\pm 0.5\%$), составляет $u_{BP} = 2$ мВт. Тогда расширенная стандартная неопределенность измерения мощности равна

$$U_P = K \sqrt{u_{AP}^2 + u_{BP}^2}. \quad (18)$$

Для вычисления неопределенности интенсивности излучения при косвенных измерениях использовалась формула

$$\begin{aligned} \sigma_I &= \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial \omega_0}\right)^2 \sigma_\omega^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial P}\right)^2 U_P^2} = \\ &= \sqrt{\left(-\frac{4P}{\pi\omega_0^3}\right)^2 \sigma_\omega^2 + \left(\frac{2}{\pi\omega_0^2}\right)^2 U_P^2}, \end{aligned} \quad (19)$$

где σ_ω — неопределенность вычисления перетяжки излучения, составившая менее нескольких единиц 10^{-18} . Тогда неопределенность частотного сдвига, вызванного ЛФОР, равна

$$\sigma_L = \Delta\alpha(\omega) I \sigma_I \text{ [Гц]}. \quad (20)$$

Таким образом, погрешность привязки ЛФОР к волномеру, а также вариации мощности излучения ЛФОР приводят к относительной неопределенности измерения частотного сдвига, вызванного излучением ЛФОР интенсивностью 14 кВт/см² при перетяжке 90 мкм, на уровне $1.4 \cdot 10^{-17}$.

2.4. Суммарная НСП ОСЧ Sr-1

Суммарная неопределенность измерений ОСЧ Sr-1 по последним нашим оценкам находится на уровне $2.5 \cdot 10^{-17}$. Основные вклады в НСП представлены в табл. 1.

Таблица 1. Бюджет НСП ОСЧ Sr-1

Сдвиг частоты	НСП, $1 \cdot 10^{-17}$
Зеемановский сдвиг	0.3
Сдвиг ЛФОР	11.4
Сдвиг ИЧТ	2.5

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕРЕБАЗИРУЕМЫХ ОСЧ

В настоящее время для сравнения территориально удаленных эталонов применяются транспортируемые водородные мазеры [19], нестабильность частоты которых не превышает нескольких единиц 10^{-16} за одни сутки.

Следующим шагом по улучшению характеристик мобильных комплексов будет их оснащение оптическими эталонами. Например, расположение в мобильном комплексе высокостабильного лазера с длиной волны 1.5 мкм и фемтосекундного синтезатора оптических частот позволит улучшить кратковременную стабильность комплекса. Также это предоставит возможность при наличии канала волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) передать сигнал на оптической частоте на большие расстояния. Это позволит повысить скорость калибровки частоты водородного мазера по удаленному стационарному ОСЧ.

Разработка полноценных транспортируемых или перебазируемых ОСЧ является актуальной задачей, которой занимаются многие лаборатории мира. Решение этой задачи предусмотрено «дорожной картой». У нас ведутся разработки перебазируемых ОСЧ на основе ультрахолодных атомов ^{171}Yb . На рис. 1 представлена его возможная реализация в фургоне. Размер фургона для расположения транспортируемого ОСЧ равен $7500 \times 2550 \times 2100$ мм³. Он состоит из трех отсеков: отсек оператора; физическая часть с оптическим спектроскопом, схемой формирования и распределения частот и другой аппаратурой; отсек измерения частот.

Физическая часть для перебазируемых ОСЧ на атомах иттербия полностью переработана относительно дизайна стационарного ОСЧ на атомах стронция. За основу выбран модульный дизайн. Сердцем системы перебазируемого ОСЧ является модуль компактного оптического спектроскопа с вакуумной камерой, источником горячих атомов и системой регистрации. Лазерное излучение доставляется к спектроскопу через одномодовые оптические волокна с сохранением поляризации от модуля с лазерными системами. Излучение на длинах волн 399 и 556 нм при этом проходит через схему распределения частот для формирования необходимых частотных отстроек излучения для зеемановского замедлителя, МОЛ и детектирования. Частоты всех лазерных систем стабилизируются с помощью метода Паунда – Древера – Холла по компактному модулю на основе высокодобротных оптических резона-



Рис. 1. Проектируемое расположение составных частей ОСЧ в фургоне. Фургон разделен на три отсека: отсек оператора, отсек физической части ОСЧ и отсек измерения частот. В отсеке оператора располагаются персональный компьютер с системой управления и источники бесперебойного питания. В отсеке с физической частью ОСЧ расположены оптический спектроскоп, схема распределения излучений и вспомогательное оборудование. В последнем отсеке расположены высокостабильные лазерные системы и фемтосекундный синтезатор оптической частот

торов. Тело резонаторов изготовлено из материала с низким коэффициентом расширения. Общий размер модуля стабилизации частот не превышает 250 мм по сумме трех измерений.

Перабазируемый ОСЧ на атомах иттербия состоит из спектроскопа с уровнем вакуума не хуже $5 \cdot 10^{-9}$ мБар, сохраняемым с помощью геттер-ионных насосов. Размер спектроскопа $50 \times 130 \text{ см}^2$. Влияние ИЧТ из-за нагрева магнитных катушек, формирующих МОЛ, оптимизировано с помощью метода конечных элементов. Катушки формируют магнитное поле с градиентом 25 Гс/см, а их максимальная температура 50 °С. Расположенные в корпусе камеры несколько датчиков температуры позволяют точнее определить НСП сдвига частоты невозмущенного «часового» перехода в атомах иттербия из-за ИЧТ.

Модуль с лазерными источниками использует диодные и волоконные лазерные системы на все необходимые длины волн, кроме длины волны «часового» перехода: 399 нм (первичная МОЛ, детектирование и зеемановский луч), 556 нм (вторичная МОЛ), 759 нм (оптическая решетка), 1388 нм (перекачивающий лазер). Для формирования частотных отстроек и включения/выключения лазерного излучения в нужные моменты циклов работы ОСЧ используется схема распределения излучения на длинах волн 399 и 556 нм. Необходимые частотные отстройки формируются с помощью разработанных во ВНИИФТРИ акустооптических модуляторов (АОМ) [20]. АОМ совместно с механи-

ческими затворами также участвуют во включении/выключении лазерного излучения. Размер данного модуля составляет $600 \times 00 \text{ мм}^2$.

Модуль частотной стабилизации лазерного излучения состоит из двух резонаторов Фабри – Перо, изготовленных из цельного образца материала, с резкостью более 20 000 для длин волн в ИК-диапазоне. Резонаторы находятся в вакууме и термостатированы. Испытания показывают, что при отклонении от вертикали модуля частотной стабилизации на угол до 20° , смещение частоты лазера не превышает 100 кГц.

В отдельном отсеке расположены лазерные системы со сверхузкой шириной линии спектра излучения: «часовой» лазер и лазер с длиной волны излучения 1.5 мкм. «Часовая» лазерная система основана на диодном лазере с внешним резонатором, который расположен в едином корпусе с высокодобротным резонатором. Он генерирует излучение на длине волны 1156 нм, которое удобно для напыления высокодобротных зеркал и передачи оптической частоты до 1 км (см. разд. 4.3). Для опроса «часового» перехода в ультрахолодных атомах иттербия необходима длина волны 578 нм, которая генерируется с помощью удвоительного кристалла на основе волноводной структуры PPLN.

В данном отсеке также расположен лазер с длиной волны 1.5 мкм, который необходим для быстрых сличений ОСЧ, удаленных друг от друга на расстоянии более 1 км, с точностью менее нескольких единиц 17-го знака.

Управление перебазируемым ОСЧ осуществляется с помощью компактной системы управления [21], составными частями которой являются персональный компьютер, на котором установлено управляющее программное обеспечение, и аппаратная часть, основанная на микроконтроллере STM32 и подключаемых модулях. Размер платы микроконтроллера составляет $11 \times 26 \text{ см}^2$, что позволяет разместить ее в ограниченном объеме фургона.

В целом, массогабаритные параметры перебазируемого ОСЧ в 2–3 раза меньше, чем стационарного ОСЧ на основе ультрахолодных атомов Sr, а энергопотребление системы уменьшается в 2 раза. При этом прогнозируемая НСП ОСЧ составляет менее $1 \cdot 10^{-17}$, что возможно за счет точного контроля температуры внутри спектроскопа и прецизионной стабилизации частоты лазера, формирующего оптическую решетку.

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛС ДЛЯ СРАВНЕНИЯ ЧАСТОТ УДАЛЕННЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ

4.1. Принцип передачи по ВОЛС высокостабильных сигналов частоты микроволновых и оптических стандартов

Территориально удаленные стандарты, как микроволновые, так и оптические, можно сравнить по частоте, используя ВОЛС для доставки выходного сигнала одного стандарта к другому. Для передачи радиочастотного выходного сигнала микроволновых стандартов используют амплитудную модуляцию лазерной несущей, распространяющейся в волоконной линии. К характеристикам лазерной несущей высоких требований не предъявляется. Чаще всего для этих целей применяют полупроводниковые лазеры с распределенной обратной связью, длина волны которых соответствует окнам прозрачности оптического волокна 1.55 и 1.31 мкм. Без промежуточных оптических усилителей в волоконной линии высокостабильный радиочастотный выходной сигнал микроволнового стандарта можно передать на оптической несущей 1.55 мкм по компенсированной волоконной линии на расстояние до 100 км. К настоящему времени в мире были созданы системы передачи и выполнены эксперименты по передаче эталонных сигналов частоты и времени по выделенным волоконным линиям на расстояние до 500 км. Для компенсации затухания оптической несущей в таких линиях через каждые 60–80 км устанавлива-

ются промежуточные оптические усилители EDFA (erbium doped fiber amplifier) [22].

Выходное излучение «часового» лазера оптического стандарта, несущее информацию о его частоте, можно непосредственно передавать по волоконной линии. Но частота практически всех высокостабильных оптических стандартов не соответствует окнам прозрачности волокна. Поэтому без преобразования частоты «часового» лазера оптического стандарта в диапазон окон прозрачности волокна его излучение передают только в относительно коротких волоконных линиях. Для передачи на большие расстояния необходимо предварительное преобразование излучения «часового» лазера ОСЧ в диапазон основного окна прозрачности волокна 1.55 мкм. Для такого преобразования используются фемтосекундные синтезаторы оптических частот. Без промежуточных оптических усилителей в волоконной линии высокостабильное оптическое излучение на длине волны 1.55 мкм можно передать по компенсированной волоконной линии на расстояние до 80 км.

Следует отметить, что оптическое волокно представляет собой материальную среду, которая возмущает распространяющийся в ней высокостабильный сигнал. Кроме того, физические свойства волокна чувствительны к воздействию факторов окружающей среды в местах прокладки волоконной линии. Поэтому передаваемый по волоконной линии оптический сигнал накапливает возмущения фазы по мере его распространения в линии. Это приводит к потере стабильности его частоты и к доплеровским сдвигам из-за дрейфа оптической длины линии, вызванного вариациями температуры окружающей среды. Радиочастотный выходной сигнал лучших микроволновых стандартов можно передать по волоконной линии без потери точности на расстояние до километра. А излучение оптических стандартов, имеющих на два порядка более высокие характеристики по сравнению с микроволновыми стандартами, начинает терять свою высокую стабильность при длине волоконной линии в несколько метров.

К настоящему времени разработаны и экспериментально опробованы различные системы передачи высокостабильных оптических и радиочастотных сигналов, обеспечивающие компенсацию возмущений фазы сигнала, вносимых волоконной линией [23, 24]. Все такие системы применяют метод распространения сигнала по линии в прямом и обратном направлениях и последующего сравнения фаз возвращенного и исходного сигнала, подаваемого на

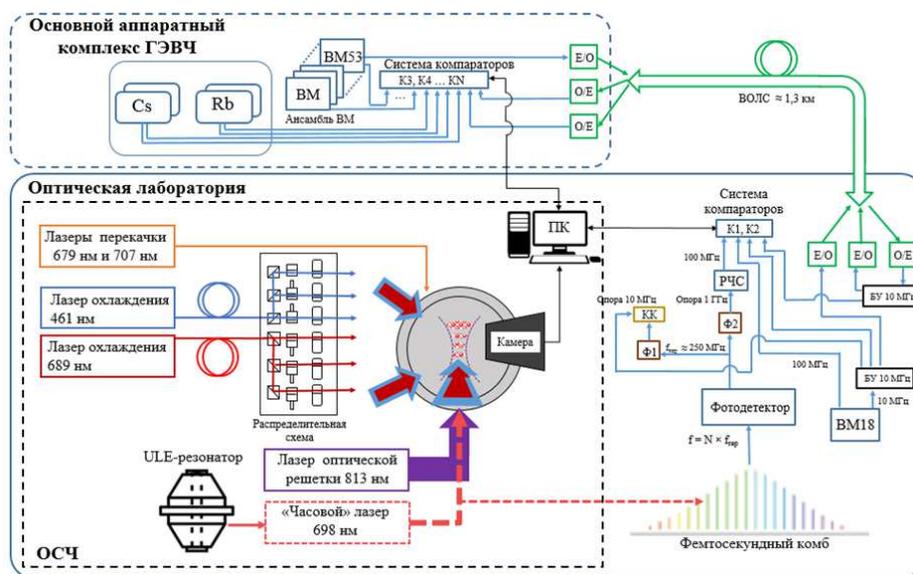


Рис. 2. Схема состава ОСЧ Sr-1, аппаратного комплекса ГЭВЧ и системы передачи и сравнения частот ОСЧ и микроволновых стандартов. БУ — буферный усилитель, Ф1 и Ф2 — фотодетекторы, КК — частотомер K+K, РЧС — радиочастотный синтезатор, K1, K2, K3,...,KN — компараторы, E/O — электрооптический преобразователь, O/E — оптико-электрический преобразователь, Cs — реперы частоты на основе цезиевого фонтана, Rb — стандарты частоты на основе рубидиевого фонтана, BM — водородные мазеры

вход линии. На основе такого сравнения вырабатывается сигнал ошибки, который используется для коррекции фазы передаваемого высокостабильного сигнала перед отправкой его по волоконной линии. Такая предварительная коррекция фазы отправляемого сигнала обеспечивает компенсацию возмущений — дополнительных фазовых шумов, вносимых волоконной линией. При передаче радиочастотного сигнала микроволнового стандарта коррекция его фазы может осуществляться, например, с помощью управляемых электронных или оптических линий задержки. Вклад компенсированной волоконной системы в погрешность переданного значения частоты радиочастотного сигнала лежит на уровне 10^{-17} при времени усреднения 10^5 с [24].

При передаче оптического излучения ОСЧ в качестве корректирующего устройства в системе компенсации используется АОМ. Корректирующий фазу АОМ включают последовательно у начала волоконной линии по схеме, предложенной и впервые реализованной в работе [25]. Подаваемый на АОМ сигнал ошибки управляет фазой передаваемого высокостабильного оптического излучения, компенсируя вносимые волоконной линией фазовые шумы. По такой схеме к настоящему времени в мире были выполнены эксперименты по передаче излучения высокостабильных лазеров с длиной волны 1.55 мкм

по выделенным компенсированным волоконным линиям на расстояние до 2000 км [26]. При этом вклад системы в погрешность передачи оптической частоты был ниже уровня 10^{-18} на интервале усреднения 10^5 с. Для компенсации затухания оптического излучения в таких длинных линиях использовались промежуточные оптические EDFA или бриллиантовые усилители [26, 27].

4.2. Система передачи и сравнения частот по ВОЛС микроволновых и оптических стандартов, входящих в состав ГЭТ-1

Для сравнения частоты ОСЧ на ультрахолодных атомах Sr-1 и водородных мазеров из состава ГЭТ-1 осуществляется передача по волоконно-оптическим линиям выходных сигналов 10 МГц водородных мазеров. Эти линии длиной 1.3 км связывают основной аппаратный комплекс ГЭВЧ и удаленную оптическую лабораторию, в которой размещен ОСЧ. Упрощенная схема состава ОСЧ, аппаратного комплекса ГЭВЧ и системы передачи радиочастотных сигналов представлена на рис. 2.

В оптической лаборатории установлен водородный мазер BM18, частота которого 100 МГц с помощью фемтосекундного синтезатора оптических частот и компаратора K1 (ВЧ-315) сравнивается с ОСЧ Sr-1. Также частота мазера BM18 сравнивается с

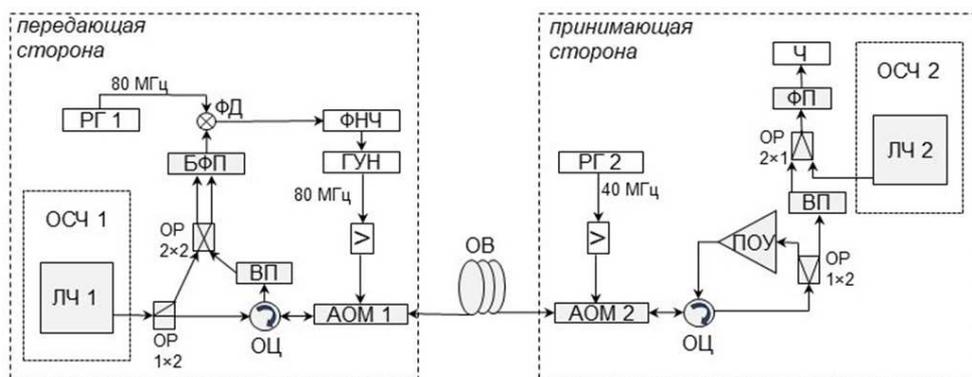


Рис. 3. Схема системы передачи излучения «часового» лазера ЛЧ 1 на 1156 нм по компенсированной оптоволоконной линии ОВ и сравнения частот «часовых» лазеров ЛЧ 1 и ЛЧ 2 удаленных ОСЧ 1 и ОСЧ 2 на атомах иттербия. ОР — оптические разветвители, ОЦ — оптические циркуляторы, ВП — вращатели поляризации, ФД — фазовый детектор, ФНЧ — фильтр нижних частот, ГУН — генератор, управляемый по частоте, АОМ 1 и АОМ 2 — акустооптические двунаправленные модуляторы на 80 МГц и на -40 МГц, РГ 1 и РГ 2 — радио генераторы, БФП и ФП — балансный фотоприемник и фотоприемник, ПОУ — полупроводниковый оптический усилитель, Ч — электронный частотомер

помощью компаратора К2 с переданным сигналом 10 МГц водородного мазера ВМ53. В свою очередь, сигнал 10 МГц мазера ВМ18 передается в основной аппаратный комплекс ГЭВЧ, где может сравниваться по частоте компараторами К3–КН с ансамблем водородных мазеров, а также со стандартами на основе рубидиевых и цезиевых фонтанов.

Результаты исследований показали, что случайная погрешность измерений частоты ОСЧ на атомах Sr с ансамблем водородных мазеров определяется собственными шумами водородного мазеров, а сама линия связи не вносит значительной погрешности в результаты измерений [28].

4.3. Система передачи по ВОЛС и сравнения частот перебазируемых оптических стандартов на атомах иттербия

На рис. 3 представлена схема системы передачи по оптоволоконной линии (ОВ) излучения высокостабильного «часового» лазера ЛЧ 1 на длине волны 1156 нм. Она построена на основе волоконного интерферометра, который обеспечивает компенсацию накопленного фазового шума в ОВ. Эта система разработана нами для сравнений частот двух перебазируемых оптических стандартов на атомах иттербия, ОСЧ 1 и ОСЧ 2, расстояние между которыми может достигать нескольких километров.

Конструкция перебазируемых ОСЧ должна быть компактной и обеспечивать возможность транспортировки стандарта на поверхности Земли, а также простую сборку и перевод его в рабочее

состояние. Свойство перебазируемости ОСЧ позволяет использовать такой стандарт в качестве эталона сравнения для сличения частот удаленных друг от друга стационарных ОСЧ. Кроме того, пара перебазируемых ОСЧ, соединенных компенсированной волоконной линией, может обеспечить измерение разности гравитационных потенциалов между точками на Земле, где установлены стандарты. Необходимость таких измерений связана с тем, что на частоту квантовых стандартов влияет релятивистский сдвиг. Поэтому одним из требований «дорожной карты» перехода к новому определению секунды является более точное знание геопотенциала в местах расположения ОСЧ. Этого можно достичь путем комбинирования региональной геодезической информации с глобальной моделью и ее дополнения результатами сравнений частот ОСЧ в разных точках на Земле. Отметим, что для моделирования геопотенциала спутниковые данные предоставляют информацию, достоверную только при пространственном разрешении 200 км или хуже. В настоящее время отдельные метрологические лаборатории оценивают гравитационные сдвиги ОСЧ с неопределенностью на уровне 10^{-18} [4].

Концепция компенсации шумов в волоконной системе передачи на рис. 3 подобна предложенной в работе [25], но имеет некоторые особенности. Они связаны с тем, что в схеме нет оптических элементов, работающих в открытом пространстве. Передача излучения «часового» лазера ЛЧ 1 осуществляется без преобразования в диапазон прозрачности оптического волокна 1.55 мкм. Передача ведется

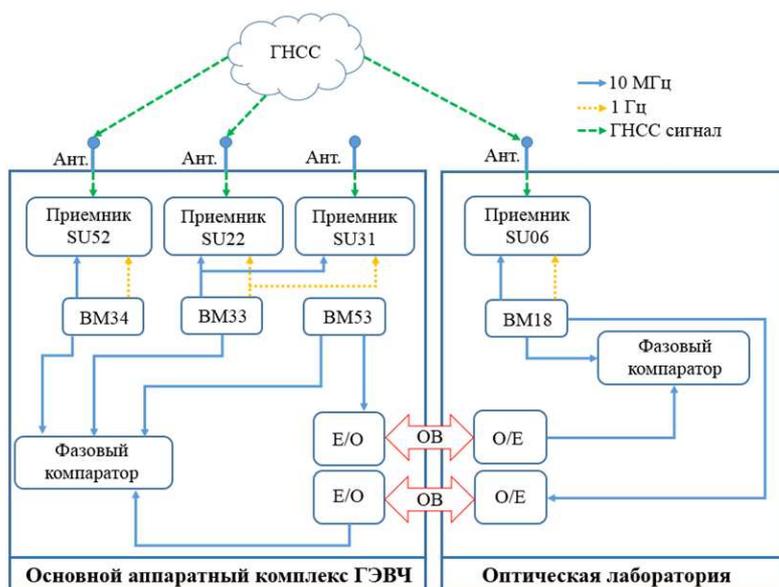


Рис. 4. Схема эксперимента по определению погрешности сравнения частот удаленных стандартов частоты с использованием ГНСС. ВМ — опорные активные водородные стандарты частоты, Е/О — электрооптический преобразователь, О/Е — оптоэлектрический преобразователь, Ант. — антенна приемников ГНСС

непосредственно на длине волны 1156 нм. Это значительно повышает надежность системы и упрощает сравнение частот ЛЧ 1 и ЛЧ 2. В такой системе не используются сложные фемтосекундные синтезаторы оптических частот. Но следует отметить, что на длине волны 1156 нм как оптическое волокно, так и все волоконно-оптические элементы в системе, такие как оптические циркуляторы, разветвители, АОМ имеют значительно большие потери, чем подобные элементы, предназначенные для работы на длине волны 1.55 мкм. В схеме на рис. 3 при длине волны 1156 нм бюджет оптических потерь с волоконной линией длиной 5 км достигает 26 дБ. Отметим, что такой бюджет потерь соответствует потерям в системе, передающей излучение лазера на длине волны 1.55 мкм по волоконной линии длиной 100 км.

Подчеркнем также, что рабочий квантовый переход в атоме Yb имеет длину волны 578 нм. Но мы выбрали лазер с длиной волны 1156 нм, а излучение на длине волны 578 нм для спектрального анализа «часового» перехода формируется с помощью удвоительного кристалла. Выбор более длинноволнового «часового» лазера на 1156 нм облегчает решение задачи передачи излучения по волоконной линии на большие расстояния. Это связано с тем, что в более коротковолновой области 578 нм длинная волоконно-оптическая линия будет иметь очень большие потери.

Оптические циркуляторы ОЦ в системе (рис. 3) обеспечивают разделение излучения, распространяющегося в волоконной линии в прямом и обратном направлениях. На балансном фотоприемнике БФП смешивается исходное излучение, подаваемое в линию, с возвращенным обратно от принимающей стороны. Необходимый для коррекции фазы сигнал ошибки вырабатывается на фазовом детекторе ФД после сравнения частоты получаемых на БФП оптических биений с опорным генератором РГ 1 на 80 МГц. Компенсационная коррекция фазы оптического излучения в линии реализуется акустооптическим модулятором АОМ 1.

Поступившее на принимающую сторону по волоконной линии ОВ излучение подается на двунаправленный акустооптический модулятор АОМ 2 на частоте 40 МГц (см. рис. 3). Этот АОМ 2 управляется стабильным радиосигналом 40 МГц. Смещенное 40 МГц оптическое излучение, пройдя циркулятор ОЦ, разделяется оптическим разветвителем ОР на два направления. Одна часть излучения усиливается полупроводниковым усилителем ПОУ и возвращается обратно к началу линии на передающей стороне. А вторая часть излучения подается на фотоприемник ФП, где смешивается с излучением «часового» лазера ЛЧ 2 из состава ОСЧ 2. Измерение с помощью электронного частотомера частоты биений 40 МГц, выделяемых на ФП, позволяет сравнить частоты ОСЧ 1 и ОСЧ 2 с высокой точностью.

5. СРАВНЕНИЕ ЧАСТОТ УДАЛЕННЫХ ОСЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛОВ ГНСС

Установленные на космических аппаратах глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) бортовые микроволновые стандарты и излучаемые ими сигналы могут использоваться в качестве своеобразных эталонов сравнения для определения разности частот ОСЧ, установленных на Земле. Создание систем, использующих сигналы ГНСС для сравнения частот удаленных ОСЧ, существенно дешевле волоконно-оптических систем, поскольку не требует прокладки дорогостоящих каналов связи [29]. ГНСС-приемники широко распространены, стоят недорого и практически не требуют затрат при эксплуатации.

Однако важным вопросом является исследование погрешности сравнения частот удаленных ОСЧ, достижимой при использовании сигналов ГНСС. Был проведен ряд экспериментов по оценке этой погрешности [30]. В эксперименте сравнивались частоты трех водородных мазеров, расположенных на объектах ГЭВЧ на расстоянии примерно 850 м друг от друга. Схема эксперимента представлена на рис. 4.

На основном аппаратном комплексе ГЭВЧ (объект «Сигнал») располагались 3 приемника ГНСС и 2 опорных активных водородных стандарта частоты (ВМ). В здании оптической лаборатории — 1 приемник ГНСС и 1 ВМ. Еще один ВМ в основном аппаратном комплексе ГЭВЧ использовался как промежуточный для сличения частот по ВОЛС. В ходе эксперимента были получены оценки разности частот опорных ВМ с использованием ГНСС и двух независимых линий ВОЛС. Это позволило провести сравнение результатов, полученных по ГНСС и ВОЛС. Предполагая, что погрешность передачи частот ВМ по ВОЛС пренебрежимо мала по сравнению с погрешностью, возникающей при использовании каналов ГНСС, была определена погрешность оценок разностей частот ВМ по ГНСС.

Определение разности частот ВМ с помощью ГНСС в эксперименте проводилось на основе оценок расхождения шкал времени (ШВ) путем формирования простой первой разности ШВ. Для определения разности ШВ использовалась методика высокоточного абсолютного позиционирования с целочисленным разрешением неоднозначности, известная как Integer precise point positioning (IPPP или PPP-AR) [31, 32]. Исходными данными для проведе-

ния решения по данной методике являются кодовые и фазовые измерения ГНСС-приемника в двух частотных диапазонах. Также требуется информация о высокоточных орбитах и поправках к бортовым ШВ навигационных спутников. Для высокоточного сравнения ШВ необходимо осуществить накопление кодовых и фазовых ГНСС-измерений на протяжении нескольких суток. Важным условием является непрерывность фазовых измерений на всем временном интервале решения задачи.

Преимуществом технологии IPPP является получение единого решения на всем массиве обрабатываемых измерений при условии непрерывности фазовых измерений. Такое решение, в отличие от традиционного метода высокоточного позиционирования PPP, не подвержено влиянию межсуточных скачков и других ухудшающих точность факторов. В результате разность расхождений шкал времени между любыми моментами времени в пределах интервала обработки может быть определена с очень высокой точностью. При этом для каждого сеанса обработки будет существовать постоянная погрешность оценки ШВ, которая зависит от шума кодовых измерений и ряда других факторов. Однако, т.к. для решения задачи измерения разности частот абсолютное значение разности ШВ не важно, необходимо знать только разность фаз ШВ. Таким образом, постоянная погрешность разности ШВ не влияет на результат, и погрешность оценки разности частот определяется только случайной составляющей фазовых измерений и применяемых в решении моделей. Случайная погрешность оценки ШВ с применением метода IPPP оценивается как не превышающая 50 пс, что соответствует погрешности сравнения частот порядка $\pm 1 \cdot 10^{-16}$ за одни сутки. Также важным преимуществом технологии IPPP является отсутствие необходимости одновременной видимости космических аппаратов. Конечно, в рамках данного эксперимента это не принципиально, поскольку приемники располагались всего в 850 м друг от друга, но при выполнении сличений на расстоянии нескольких тысяч километров данный фактор приобретает первостепенное значение.

Эксперимент проводился в течение четырех месяцев: с 29 сентября 2022 г. по 29 января 2023 г. Это позволило оценить стабильность решений IPPP на интервалах вплоть до двух месяцев. В качестве меры погрешности в эксперименте была выбрана модифицированная девиация Аллана, которая часто используется для оценки характеристик каналов сличений. Сначала рассчитывалась разность оценок

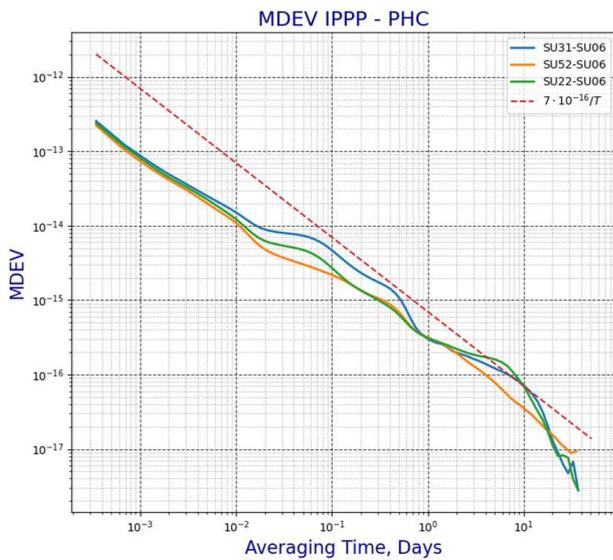


Рис. 5. Модифицированная девиация Аллана (MDEV) ошибки определения разности частот с помощью IPPP (PHS — фазовый компаратор)

частот, полученных на основе измерений с помощью различных ГНСС-приемников (IPPP) и измерений по ВОЛС с помощью фазового компаратора. Затем вычислялись девиации этих разностей, которые представлены на рис. 5. По оси *y* изображена непосредственно модифицированная девиация Аллана, а по оси *x* — время усреднения в сутках.

Как видно из представленного графика, при усреднении от 20 сут метод IPPP дает возможность сравнивать частоты удаленных стандартов с неопределенностью порядка нескольких единиц 10^{-17} при условии непрерывности фазовых измерений и отсутствии проблем при обработке. Штриховой линией на графике показана модифицированная девиация Аллана теоретического шумового процесса с фазовым фликер-шумом 35 пс. Для такого процесса эта величина линейно убывает с увеличением времени усреднения. Близость полученных результатов к данному процессу на больших интервалах усреднения позволяет предположить дальнейшую тенденцию уменьшения погрешности метода IPPP также по линейному закону в зависимости от времени усреднения.

Зарубежными специалистами также проводились эксперименты, в ходе которых сравнивались оценки, полученные методом IPPP и по оптическому каналу сличений частот. В иностранном эксперименте использовалась существенно более длин-

Таблица 2. Сравнение методов сличения частот ОСЧ

Методы	ВОЛС	ПОСЧ	ГНСС
Достижимая НСП	$< 5 \cdot 10^{-19}$	$< 3 \cdot 10^{-17}$	$\sim 5 \cdot 10^{-17}$
Достоинства	Высокая точность за счет компенсации фазовых шумов, вносимых ВОЛС	Гибкость, т.к. перебазируемые ОСЧ могут быть перемещены в любую точку	Широко распространены, менее дорогостоящие
Недостатки	В РФ затруднено использование телекоммуникационных ВОЛС для целей передачи высокостабильных сигналов	Технически сложно достичь метрологических характеристик, на уровне стационарных ОСЧ	Требуется длительное усреднение (> 20 сут)

ная линия ВОЛС и было показано [33], что случайная погрешность метода IPPP также не превышает $1 \cdot 10^{-16}$ на интервале усреднения 3 сут для базовых линий длиной до 1000 км. Это соответствует результатам, полученным в ходе нашего эксперимента. Проведение сравнений на более длинных базовых линиях для проверки метода затруднено из-за отсутствия альтернативного волоконно-оптического или какого-либо иного канала для передачи высокостабильных сигналов с требуемой точностью.

Недостатком использования метода IPPP для решения задачи сравнения частот удаленных ОСЧ является необходимость проведения длительного усреднения для получения требуемой точности. Это ограничивает применение метода и не позволяет сравнивать частоты ОСЧ непосредственно, поскольку время непрерывной работы ОСЧ, как правило, не превышает нескольких дней. Поэтому необходимо использовать микроволновые ВМ в качестве промежуточных часов, которые сличаются с помощью IPPP, а ОСЧ, в свою очередь, сравниваются с ВМ.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено уточнение составляющих бюджета неопределенности ОСЧ Sr-1, входящего в состав ГЭТ-1. Это позволило оценить его суммарный бюджет НСП на уровне $2.5 \cdot 10^{-17}$. Описана внутриобъектовая система передачи и сравнения частот по ВОЛС микроволновых и оптических стандартов, входящих в состав ГЭТ-1.

Представлен аванпроект перебазируемого ОСЧ на ультрахолодных нейтральных атомах иттербия и описана схема сличений оптических частот удаленных друг от друга перебазируемых ОСЧ на атомах иттербия по ВОЛС.

Проведено экспериментальное сравнение способов сличений выходных сигналов микроволновых стандартов частоты с помощью ВОЛС и при использовании сигналов ГНСС. Для этого были выполнены измерения, позволившие сравнить результаты сличений частот территориально рассредоточенных водородных мазеров, входящих в состав ГЭТ-1, которые были получены методом передачи сигналов по ВОЛС и методом IPPP.

Выше в табл. 2 приведено сравнение трех рассмотренных методов сравнения частот двух удаленных ОСЧ.

У каждого метода есть свои преимущества и недостатки, но наиболее достижимым на данный момент представляется метод сличений через сигналы ГНСС из-за относительной простоты использования, хотя он и требует усреднения данных за 20 сут. В заключение отметим, что для принятия нового определения секунды необходимо иметь возможность сравнения частот ОСЧ в континентальном и трансконтинентальном масштабах. Предполагается, что в будущем сравнение частот оптических стандартов будет основываться на передаче сигналов в локальных оптоволоконных сетях, соединенных неволоконными межконтинентальными линиями связи [29]. Следовательно, необходимо развивать все три указанных в табл. 2 метода сличения ОСЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Terrien, *Metrologia* **4**, 41 (1968).
2. G. Petit, F. Arias, and G. Panfilo, *Compt. Rend. Phys.* **16**, 480 (2015).
3. T. Bothwell, D. Kedar, E. Oelker et al., *Metrologia* **56**, 65004 (2019).
4. N. Dimarcq, M. Gertsvolf, G. Miletì et al., *Metrologia* **61**, 012001 (2024).
5. С. И. Донченко, И. Ю. Блинов, И. Б. Норец и др., *Измер. техника* **1**, 35 (2020).
6. Д. В. Сутырин, О.И. Бердасов, С.Ю. Антропов и др., *КЭ* **49**, 199 (2019).
7. Г. С. Белотелов, Д. В. Сутырин, С. Н. Слюсарев, *Альманах современной метрологии* **4**, 100 (2021).
8. А. П. Вялых, П. И. Скакуненко, М. В. Шишова и др., *Письма в ЖЭТФ* **119**, 273 (2024).
9. D. Xiong, Q. Zhu, J. Wang et al., *Metrologia* **58**, 35005 (2021).
10. T. Middelmann, S. Falke, C. Lisdat et al., *Phys. Rev. Lett.* **109**, 263004 (2012).
11. S. G. Porsev and A. Derevianko, *Phys. Rev. A* **74**, 20502 (2006).
12. M. S. Safronova, S. G. Porsev, U. I. Safronova et al., *Phys. Rev. A* **87**, 12509 (2013).
13. T. L. Nicholson, S. L. Campbell, R. B. Hutson et al., *Nat. Commun.* **6**, 6896 (2015).
14. A. V. Taichenachev, V. I. Yudin, C. W. Oates et al., *Phys. Rev. Lett.* **96**, 83001 (2006).
15. X. Baillard, M. Fouche, R. Le. Targat et al., *Eur. Phys. J. D* **48**, 11 (2008).
16. M. M. Boyd, T. Zelevinsky, A. D. Ludlow et al., *Phys. Rev. A* **76**, 22510 (2007).
17. V. D. Ovsiannikov, S. I. Marmo, V. G. Palchikov et al., *Phys. Rev. A* **93**, 43420 (2016).
18. G. S. Belotelov, V. D. Ovsiannikov, D. V. Sutyurin et al., *Laser Phys.* **30**, 45501 (2020).
19. И. Ю. Блинов, Ю. Ф. Смирнов, Ф. Р. Смирнов, *Вестник метролога* **3**, 3 (2018).
20. М. М. Мазур, Л. И. Мазур, В. Н. Шорин и др., *КЭ* **52**, 661 (2022).
21. A. V. Semenko, A. P. Vyalykh, D. A. Paryohin et al., in *Proc. 26th Int. Conf. on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA)*, IEEE (2024), pp. 1–5.

22. V. Smotlacha, A. Kuna, and W. Mache, in *Proc. of the 42nd Annual PTTI* (2010), p. 427.
23. К. Ю. Хабарова, Е. С. Калганова, Н. Н. Колачевский, УФН **188**, 221 (2018).
24. Р. И. Балаев, А. Н. Малимон, Д. М. Федорова и др., Измер. техника **38** (2017).
25. L.-S. Ma, P. Jungner, J. Ye et al., *Opt. Lett.* **19**, 1777 (1994).
26. S. Droste, F. Ozimek, Th. Udem et al., *Phys. Rev. Lett.* **111**, 110801 (2013).
27. O. Terra, G. Grosche, and H. Schnatz, *Opt. Express* **18**, 16102 (2010).
28. Д. В. Сутырин, А. Ю. Грибов, Р. И. Балаев и др., КЭ **52**, 498 (2022).
29. M. Pizzocaro, M. Sekido, K. Takefuji et al., *Nat. Phys.* **17**, 223 (2021).
30. В. Ф. Фатеев, А. А. Карауш, Ф. Р. Смирнов, ЖТФ **93**, 23 (2023).
31. P. Collins, S. Bisnath, F. Lahaye et al., *Navigation* **57**, 123 (2010).
32. S. Loyer, F. Perosanz, F. Mercier et al., *J. Geod.* **86**, 991 (2012).
33. G. Petit, J. Leute, S. Loyer, and F. Perosanz, in *Proc. Joint Conf. EFTF/IFCS*, IEEE (2017), p. 784.