На пути к формированию оптической шкалы времени во ВНИИФТРИ

Д.В.Сутырин, А.Ю.Грибов, Р.И.Балаев, А.А.Горохина, В.Г.Пальчиков, А.Н.Малимон, С.Н.Слюсарев

Представлена обновленная цепь преобразования частоты оптического стандарта на ультрахолодных атомах ^{87}Sr с целью ее сравнения с частотой микроволновых стандартов из состава Государственного первичного эталона времени и частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018. Приведены и проанализированы результаты соответствующих экспериментов. Описан аппаратный комплекс воспроизведения и хранения единиц времени, частоты и национальной шкалы времени первичного эталона, в который включен оптический стандарт на атомах стронция и микроволновые стандарты нового поколения, а также определен порядок формирования атомной шкалы времени с участием оптических стандартов.

Ключевые слова: *оптический стандарт частоты, шкала времени, ультрахолодные атомы.*

1. Введение

Следует ожидать, что в обозримом будущем определение секунды в Международной системе единиц СИ будет изменено. Консультативный комитет по времени и частоте (CCTF) рекомендовал ряд практических шагов, которые необходимы для переопределения секунды в системе СИ относительно текущего определения, основанного на микроволновом сверхтонком переходе в атомах цезия ^{133}Cs, к новому, которое будет основываться на измерениях частоты оптического стандарта [1, 2]. Одним из требуемых действий, которые необходимо выполнить до вынесения решения о переходе на новое определение секунды, является проведение исследований по применению высокостабильных оптических стандартов частоты (ОСЧ) для формирования международной шкалы атомного времени TAI в соответствии с процедурами, установленными для микроволновых стандартов [3]. Для практической реализации данного подхода национальные лаборатории времени должны на протяжении нескольких лет сравнивать с высокой точностью частоты оптических стандартов с микроволновыми стандартами, входящими в состав национальных эталонов, и формировать локальные шкалы TA(k) с учетом такого сравнения. На основании переданных национальными лабораториями в Международное бюро мер и весов (МБМВ) данных о таких сравнениях оно должно устанавливать и поддерживать международную шкалу времени TAI.

Д.В.Сутырин, А.Ю.Грибов, Р.И.Балаев, А.Н.Малимон, С.Н.Слюсарев. Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Россия, 141570 Московская обл., Солнечногорск, пос. Менделеево;
e-mail: sutyrin@vniiftri.ru
А.А.Горохина, В.Г.Пальчиков. Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Россия, 141570 Московская обл., Солнечногорск, пос. Менделеево; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

Поступила в редакцию 3 марта 2022 г., после доработки – 22 апреля 2022 г.

Сравнение шкал времени TA(k), сформированных с учетом вклада высокостабильных оптических стандартов, должно продемонстрировать в течение ближайшего десятилетия лучшую сходимость национальных шкал времени и тем самым дать экспериментально подтвержденное обоснование целесообразности принятия нового определения секунды. Следовательно, выполнение рекомендованного CCTF шага по реализации вклада ОСЧ в формирование шкалы атомного времени TAI является актуальной задачей в области метрологии времени и частоты.

Во ВНИИФТРИ (Россия) был разработан оптический стандарт частоты на ультрахолодных, удерживаемых в оптической решетке атомах ^{87}Sr, который в 2018 г. был введен в состав Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018.

Бюджет неопределенности воспроизведения единиц времени и частоты современных оптических стандартов составляет около 10^{-17} [4–8]. Однако вклад в формирование TAI и неопределенность воспроизведения секунды, вносимый ОСЧ на атомах ^{87}Sr, составляет $\sim 4\times10^{-16}$, поскольку переход $^1S_0-^3P_0$ в этом атоме используется для вторичного определения секунды в системе единиц СИ [9]. Абсолютная частота этого оптического перехода определена на основе предыдущих измерений относительно эталонного сверхтонкого перехода в атомах цезия ^{133}Cs при сравнениях частот ОСЧ на атомах стронция и первичных цезиевых реперов фонтанного типа [10–13]. Неисключенная систематическая погрешность последних по порядку величины составляет несколько единиц на 10^{-16} [10–15].

Отметим, что в настоящее время в метрологических лабораториях мира 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 оно устанавливает и поддерживает шкалу времени TAI.

После выполнения первых экспериментов во ВНИИФТРИ по измерению частоты ОСЧ на атомах ^{87}Sr [16] мы преобразовали схему эксперимента по сравнению

частоты ОСЧ на ультрахолодных атомах ^{87}Sr с частотой ансамбля водородных мазеров, которые являются составной частью ГЭТ 1-2018. В настоящей работе представляем состав аппаратного комплекса ГЭТ 1-2018, порядок формирования шкалы времени, а также обновленную схему измерений частоты ОСЧ [16, 17] относительно частоты ансамбля водородных мазеров. Приводятся результаты измерений СКДО (стандартной статистической неопределенности, оцениваемой по типу А) при измерениях частоты часового лазера, стабилизированного по переходу $^1S_0-^3P_0$ в атомах ^{87}Sr, относительно частоты одного из водородных мазеров, входящих в состав первичного эталона. Вклады в статистическую неопределенность u_A дают: случайная погрешность при преобразовании частоты из оптической области в диапазон радиочастот; случайная погрешность передачи частоты водородного мазера в лабораторию для сравнения с частотой ОСЧ; погрешность, связанная с измерительными приборами.

Разработанные в различных лабораториях ОСЧ на атомах, удерживаемых в оптической решетке, пока не достигли той надежности, которой обладают микроволновые часы. Это связано с тем, что в составе ОСЧ на атомах стронция должно одновременно работать несколько высокостабильных лазерных источников. Время непрерывной безотказной работы ОСЧ на атомах стронция может составлять от нескольких часов до нескольких дней [18, 19], что существенно меньше, чем не только у водородных мазеров, но и у цезиевых стандартов, включая атомные стандарты частоты фонтанного типа. В связи с этим необходимо, чтобы при сравнениях частот ОСЧ с частотами непрерывно работающих хранителей частоты и времени – водородных мазеров – случайная погрешность на интервалах времени усреднения до нескольких часов была минимально возможной. Поэтому основной целью обновления схемы сравнения частоты оптического стандарта с ансамблем водородных мазеров было уменьшение статистической неопределенности u_A.

Выполненные с новым составом комплекса воспроизведения и хранения времени и частоты ГЭТ 1-2018 и обновленной цепью преобразования в радиодиапазон частоты оптического стандарта на атомах ^{87}Sr, необходимой для функционирования схемы сравнения частоты оптического стандарта и водородных мазеров, измерения имеют СКДО $6 \times 10^{-14}/\tau^{1/2}$ на интервалах времени усреднения от 1 до 3600 с.

2. Стандарты частоты первичного эталона

В состав комплекса воспроизведения и хранения времени и частоты Государственного первичного эталона входят различные стандарты частоты, представленные на рис.1. В настоящее время они обеспечивают основу функционирования первичного эталона, воспроизводящего и хранящего единицы времени, частоты и национальную шкалу времени.

Главные составные части комплекса – это ОСЧ и водородный мазер Н18, находящиеся в оптической лаборатории, а также территориально удаленный ансамбль водородных мазеров – хранителей времени и частоты, первичные реперы на основе фонтана атомов цезия, хранители на основе фонтана холодных атомов рубидия, волоконно-оптические линии, обеспечивающие передачу радиочастотных эталонных сигналов между оптической лабораторией и зданием, в котором размещен ансамбль мазеров и первичные цезиевые реперы. Сравнение частот всех этих стандартов и реперов, входящих в состав первичного эталона, вносит вклад в формирование и хранение национальной шкалы времени TAI (SU) и UTC (SU).

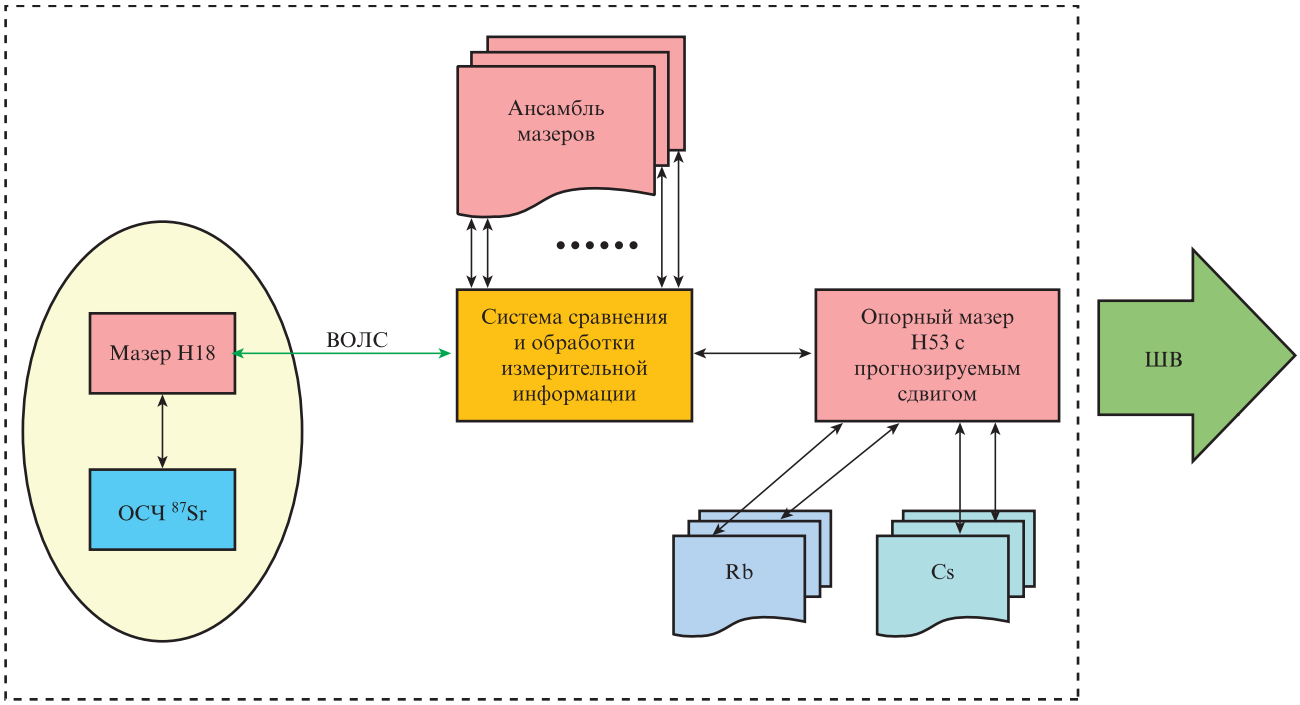

Рис.1. Общий состав комплекса стандартов частоты первичного эталона:
ОСЧ – оптический стандарт частоты на основе ультрахолодных атомов ^{87}Sr; ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи; Cs – первичный стандарт частоты на основе цезиевого фонтана; Rb – хранитель частоты на основе рубидиевого фонтана; ШВ – формируемая атомная шкала времени на основе сравнений группы водородных мазеров с микроволновыми и оптическими стандартами частоты.

2.1. Шкала времени, формируемая во ВНИИФТРИ

Национальная шкала координированного времени РФ UTC (SU) воспроизводится и поддерживается Государственным первичным эталоном времени и частоты, который эксплуатируется на объекте, расположенном в Менделеево (Московская обл., Россия). Основной целью системы первичных стандартов частоты ВНИИФТРИ, включающей два цезиевых фонтана, является выполнение регулярного вклада в международную шкалу времени TAI/UTC с высокой точностью и обеспечение стабильного источника сигналов для формирования UTC (SU) – локальной реализации UTC в России.

Ниже приведены основные результаты исследований и разработок по улучшению стандартов времени и частоты, включая новое поколение Н-мазеров, стандартов на основе фонтана атомов Rb и нейтральных атомов ^{87}Sr в оптической решетке.

Реперы частоты фонтанного типа CsFO1 и CsFO2 действуют во ВНИИФТРИ уже почти 9 лет. С 2014 г. CsFO2 официально включен в расчеты международной шкалы TAI. Стандарт CsFO2 используется для повышения стабильности и точности локальной реализации UTC. На рис.2 представлены результаты сравнения шкал времени России (UTC (SU)), Германии (UTC (PTB)) и США (UTC (USNO)) относительно шкалы координированного времени UTC. Использование в составе Государственного первичного эталона России реперов частоты фонтанного типа на атомах цезия, а также водородных хранителей нового поколения позволило России войти в число стран-лидеров по национальной реализации шкалы координированного времени UTC (SU) [20].

Единицы измерения времени и частоты поддерживаются независимо с помощью обновленного комплекса водородных Н-мазеров с суточной нестабильностью частоты $(2-3)\times10^{-16}$ [21] в течение месячного периода времени, прошедшего между последней официальной публикацией данных UTC и следующей публикацией в циркуляре Т Международного Бюро Мер и Весов. В настоящее время комплекс предназначен для хранения единиц времени и частоты, обеспечения как внутренних, так и внешних сравнений стандартов, формирования рабочих шкал времени, расчета национальной атомной шкалы времени TA (SU) и координированной UTC (SU).

Результаты сравнения реализаций шкал времени публикуются в циркуляре Т МБМВ (CIRCULAR T BIPM) в виде разности [UTC – UTC (k)], TAI – UTC и [TAI – TA (k)] и в бюллетенях Главного метрологического центра ГСВЧ. Отметим, что шкала всемирного координированного времени UTC поддерживается так, что значение разности UTC – TAI составляет целое число секунд [22].

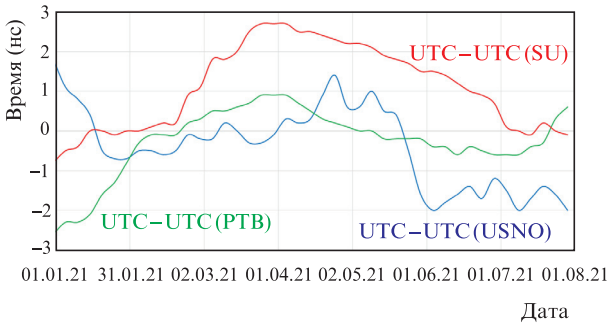

Рис.2. Национальные локальные реализации UTC (k).

Ансамбль водородных хранителей включает в себя Н-мазеры СН-75А-01 (восемь единиц), Н-мазеры СН1-1033 (четыре единицы) и новое поколение Н-мазеров (шесть единиц).

Шкала времени UTC (SU) рассчитывается на основе TA (SU), контролируется и корректируется по отношению к UTC, как только становится доступной следующая публикация МБМВ (один раз в месяц). Согласно этому документу смещение шкалы времени UTC (SU) относительно UTC не превысило 3 нс в 2021 г. (см. рис.2) [23].

Важно отметить, что ВНИИФТРИ участвует в реализации ФЦП «ГЛОНАСС» и является головным метрологическим учреждением России, занимающимся созданием новых и модернизацией существующих эталонных средств в области времени и частоты, позиционирования и навигационного обеспечения с целью достижения заданных метрологических характеристик ГЛОНАСС. В настоящее время шкала времени UTC (SU) передается на наземный контрольный сегмент ГЛОНАСС с помощью приемников навигационных сигналов и является национальной реализацией UTC в соответствии с требованиями BIPM.

2.2. Стандарт частоты на атомах Sr

Оптический стандарт на основе ультрахолодных атомов стронция 87, включенный в ГЭТ 1-2018, был разработан во ВНИИФТРИ в 2020 г. [24]. В оптическом стандарте данного типа для осуществления двух последовательных стадий лазерного охлаждения на длинах волн λ = 461 и 689 нм соответственно используется набор диодных лазеров охлаждения и перекачки. Это позволяет подготовить ансамбль из 10^5 атомов, захваченных при температуре ~2.5 мкК в магнитооптическую ловушку. Ансамбль атомов затем загружается в вертикальную одномерную оптическую решетку, создаваемую стоячей волной излучения с λ = 813 нм от диодного лазера с оптическим усилителем, настроенного на «магическую» длину волны. Это обеспечивает удержание ансамбля атомов с пренебрежимо малым возмущением частоты часового перехода [25]. Спектроскопия часового перехода осуществляется с помощью лазерной системы, основанной на использовании диодного лазера Toptica DL Pro (λ = 698 нм), который стабилизирован по внешнему ULE (ultra-low expansion glass) резонатору, имеющему резкость 277 500. Характеристики часовой лазерной системы были получены путем исследования сигнала биений между двумя идентичными образцами [17].

Без учета линейного дрейфа относительная нестабильность частоты лазера на интервалах времени измерения от 1 до 100 с падает до уровня $(2-3)\times10^{-15}$ при спектральной ширине линии ~1 Гц. Частоты данных лазерных систем имеют линейный относительный дрейф на уровне 200 мГц/с. Часовой лазер стабилизируется по переходу $^1S_0-^3P_0$ путем последовательной спектроскопии компонент ($m_F = +9/2 - m_{F'} = +9/2$) и ($m_F = +9/2 - m_{F'} = -9/2$), после чего определяется центральная частота перехода. Измеренная относительная вероятность перехода $P \sim 0.4$ достигается для каждой компоненты при спектральной ширине 12 Гц на полувысоте резонанса [17]. Продолжительность одного рабочего цикла, состоящего из двух

стадий лазерного охлаждения, загрузки атомов в оптическую решетку и определения вероятности перехода P, составляет около 1.3 с.

Долговременная стабилизация лазера на $\lambda = 698$ нм по часовому переходу достигается с помощью следующего программного алгоритма. После получения предварительного спектра перехода $^1S_0 - {}^3P_0$ и определения его резонансной частоты f_{res}, а также ширины его спектральной линии выбирается величина шага перестройки частоты, позволяющая восстановить спектр по числу n точек. На первом этапе формируется массив, состоящий из частот по точкам и их соответствующих вероятностей перехода P на верхний атомный уровень. Затем внутри массива определяется частота $f_{res,n}$ (n – номер рабочего цикла), соответствующая максимальному значению вероятности P. В определенное ранее значение резонансной частоты $f_{res,n-1}$ вносится коррекция, равная $f_{res,n} = f_{res,n-1} + \Delta f$, где $\Delta f = k\,(f_{res,n} - f_{res,n-1})$ и k – коэффициент, который выбирается экспериментально.

2.3. Волоконно-оптические линии в системе сравнения стандартов частоты ГЭТ 1-2018

ОСЧ на основе ультрахолодных атомов ^{87}Sr расположен в оптической лаборатории на расстоянии 1.3 км от основного аппаратного комплекса Государственного первичного эталона ГЭТ 1-2018 единиц времени, частоты и национальной шкалы времени. В состав основного комплекса входят первичные стандарты – цезиевые реперы и хранители на основе рубидиевых фонтанов и ансамбля водородных Н-мазеров, а также компараторы для сравнения частот этих микроволновых стандартов. Мазер Н53 является опорным генератором в ансамбле Н-мазеров, которые обеспечивают хранение национальной шкалы времени.

Из всего ансамбля Н-мазеров только мазер Н18 находится непосредственно в оптической лаборатории рядом с ОСЧ. В связи с удаленным расположением мазера Н18 сравнение его с мазером Н53 осуществляется с помощью системы передачи их выходных радиочастотных сигналов по волоконно-оптическим линиям. Схема измерений, обеспечивающая сравнение с помощью многоканальных компараторов частот стандартов, входящих в основной состав аппаратного комплекса первичного эталона ГЭТ 1-2018, представлена на рис.3.

Оптические трансмиттеры (ОТ1 – ОТ3) и оптические ресиверы (ОР1 – ОР3) подключены к концам волоконно-оптических линий, связывающих оптическую лабораторию и основной аппаратный комплекс первичного эталона ГЭТ 1-2018. Выходные сигналы мазеров Н18 и Н53 с частотой 5 и 10 МГц передаются по стандартному волокну SMF-28 путем амплитудной модуляции оптической несущей трансмиттеров, имеющих длину волны 1.3 мкм. Поступивший в оптическую лабораторию сигнал мазера Н53 также передается обратно для сравнения его с исходным сигналом мазера Н53, чтобы оценить влияние волоконной линии на неопределенность передачи его частоты. Измерения показали, что вклад волоконной систе-

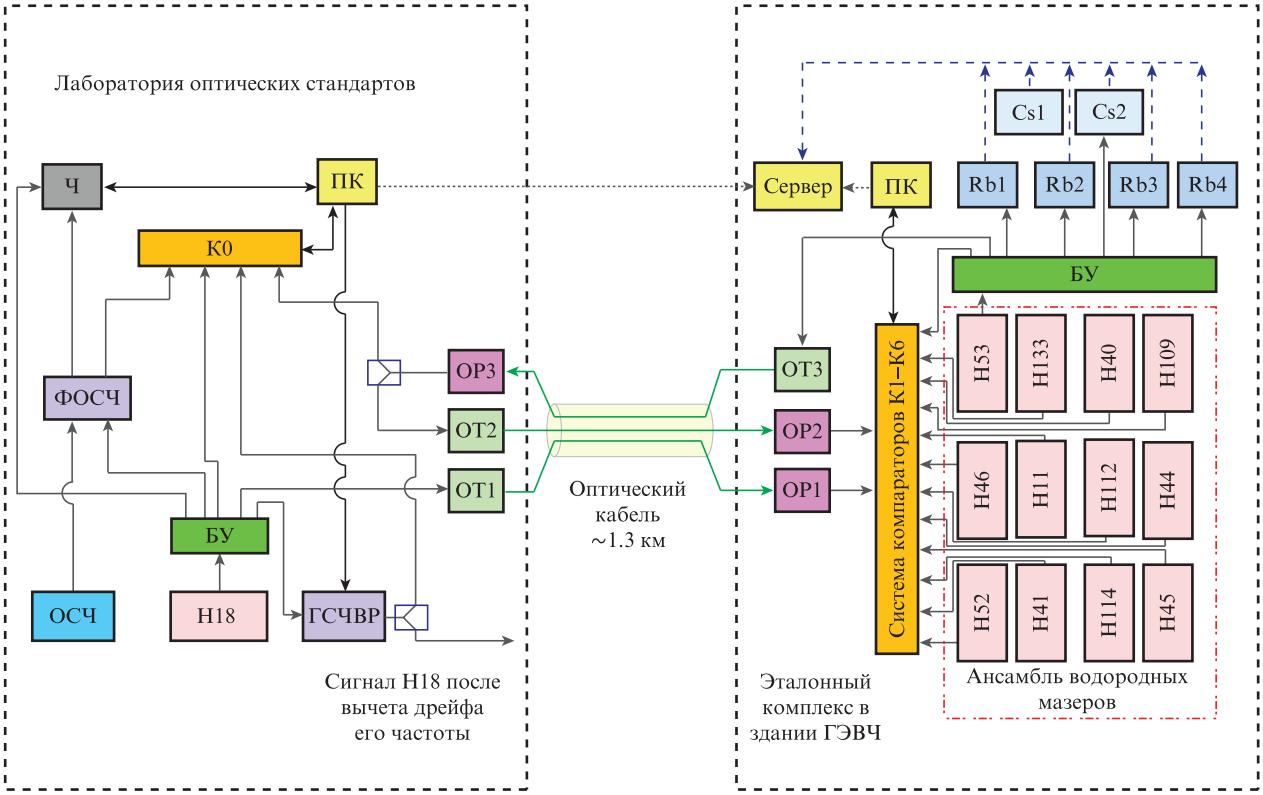

Рис.3. Схема измерений, обеспечивающая сравнение с помощью многоканальных компараторов частот стандартов, входящих в основной состав аппаратного комплекса первичного эталона ГЭТ 1-2018:
БУ – буферный усилитель; К0, К1 – К6 – многоканальные фазовые компараторы; ОТ – оптические трансмиттеры; ОР – оптические ресиверы; ПК – персональный компьютер; Ч – измеритель частоты ОСЧ относительно частоты водородного мазера Н18 (электронный частотомер); ФОСЧ – фемтосекундный оптический синтезатор частоты; ГСЧВР – генератор, обеспечивающий сдвиг частоты с высоким разрешением; ОСЧ – оптический стандарт частоты на основе ультрахолодных атомов ^{87}Sr; Cs – первичные стандарты частоты на основе цезиевого фонтана; Rb – хранители частоты на основе рубидиевого фонтана.

мы передачи в неопределенность сравнений частот водородных мазеров не превышает 2×10^{-16} при времени контроля 10^5 с.

Сравнение частот мазеров H18 и H53 осуществляется многоканальными компараторами К1 – К6, размещенными в аппаратном комплексе первичного эталона, а также компаратором К0, установленным в оптической лаборатории.

Сравнение частот ОСЧ и мазера H18 осуществляется с помощью переносчика на основе фемтосекундного оптического синтезатора частоты, формирующего оптическую частотную гребенку. Результаты сравнения, которые обрабатываются и накапливаются в компьютере ПК, позволяют определить дрейф частоты мазера H18 относительно ОСЧ. На выходе генератора ГСЧВР, обеспечивающего сдвиг частоты с высоким разрешением, формируется под управлением ПК скорректированный сигнал мазера H18, у которого вычтен дрейф частоты по результатам его сравнений с ОСЧ. Сигнал на выходе генератора ГСЧВР является основой для формирования оптической шкалы времени.

2.4. Система измерения частоты ОСЧ

При работе ОСЧ на атомах Sr частота его часового лазера на $\lambda = 698$ нм переносится в радиодиапазон с помощью оптической частотной гребенки и сравнивается с частотой выходного сигнала H-мазера, составляющей 5, 10 или 100 МГц.

Упрощенная схема, поясняющая процесс преобразования частоты оптического репера в радиодиапазон и измерения его частоты, представлена на рис.4. Излучение часового лазера на $\lambda = 698$ нм, предварительно стабилизированного ULE-резонатором, направляется на атомы Sr для спектроскопии часового перехода. После детектирования фотонов EMCCD-камерой с электронным умножением получаемый сигнал анализируется с помощью программного обеспечения ПК. Управляющий сигнал с ПК обеспечивает коррекцию частоты выходного излучения часового лазера с помощью АОМ. Часть излучения часового лазера смешивается с соответствующей модой синтезатора частоты ФОСЧ. Быстродействующий фотоприемник ФП детектирует частоту повторения f_{rep}, частоту офсета f_{ceo} и частоту оптических биений f_{beat}. На выходе ФОСЧ n-я гармоника частоты f_{rep} гребенки регистрируется быстродействующим фотоприемником. Затем усиленный сигнал f_{rep} разделяется фильтрами на первую и четвертую гармоники.

Сигнал с частотой 1-й гармоники f_{rep} (~250 МГц) поступает на многоканальный частотомер с нулевым мертвым временем (K&K Messtechnik FXE) и измеряется относительно частоты мазера H18. Это старая часть схемы измерения преобразованной частоты ОСЧ на выходе ФОСЧ. Частотомер также одновременно измеряет биения частоты часового лазера с ближайшей линией гребенки и частоту офсета гребенки f_{ceo}. Для ослабления влияния вариаций температуры в оптической лаборатории на погрешность измерений фотоприемник, фазовый компаратор, частотомер и ВЧ синтезатор помещены в камеру с постоянными климатическими условиями.

Сигнал с частотой 4-й гармоники f_{rep} (~1 ГГц) используется как опорный для малошумящего РЧ синтезатора, что позволило реализовать новую схему более точного измерения преобразованной частоты ОСЧ на выходе ФОСЧ с помощью фазового компаратора (см. рис.4). Частота синтезированного сигнала, получаемого на выходе РЧ синтезатора, оказывается «привязанной» к ОСЧ и может быть установлена вблизи значений 5, 10 или 100 МГц. Сигналы с такими значениями частоты могут измеряться с высокой точностью фазовым компаратором, который в качестве опорного генератора использует мазер H18. Однако для выполнения измерений фазовым компаратором необходимо, чтобы относительное отклонение частоты синтезированного сигнала на выходе РЧ синтезатора от частоты выходного сигнала мазера H18 не превышало 10^{-11}.

Использование в обновленной схеме измерений РЧ синтезатора и фазового компаратора позволяет от-

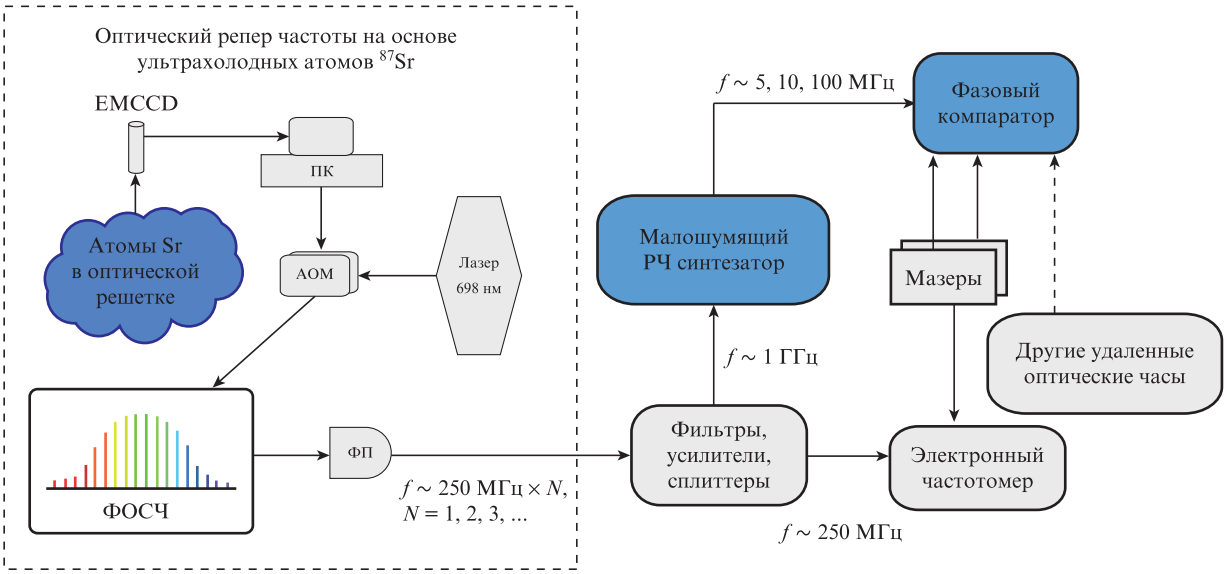

Рис.4. Схема преобразования частоты оптического стандарта в радиодиапазон и обновленная цепь измерения преобразованной частоты фазовым компаратором:
EMCCD – ПЗС-камера с электронным умножителем; ПК – персональный компьютер; ФП – быстродействующий фотоприемник; АОМ – акустооптический модулятор; ФОСЧ – фемтосекундный оптический синтезатор частот.

фильтровать шум, возникающий при преобразовании сигнала ОСЧ в диапазон радиочастот, а также шум, генерируемый внутри измерительной системы, и избежать ошибок подсчета измерения f_{rep} частотной гребенки. Ранее f_{rep} измерялась только частотомером с нулевым мертвым временем [16]. В обновленной схеме при измерении частоты 4-й гармоники f_{rep} была реализована дополнительная цепь преобразования и фильтрации шумов на основе малошумящего РЧ синтезатора и фазового компаратора. Отметим, что используемый фазовый компаратор Время-Ч имеет узкую, порядка 3 Гц, полосу пропускания.

РЧ синтезатор генерирует частоты с шагом 1 мГц. Это позволяет установить частоту синтезатора так, чтобы она соответствовала частоте мазера H18 с относительным отклонением, меньшим 10^{-11}. Именно это дает возможность использовать фазовый компаратор Время-Ч для сравнения частоты Н-мазера и частоты повторений гребенки f_{rep}. Наблюдаемая нестабильность частоты при измерениях f_{rep} на интервалах времени измерения τ от 1 до 3600 с примерно соответствует $\sigma_y = 6 \times 10^{-14}\ (1/\tau)^{1/2}$ и, следовательно, определяется шумом Н-мазера. Этот вывод подтверждается тем, что именно такую нестабильность частоты на интервалах времени измерения до одного часа имеют водородные мазеры нового поколения, к которым относится и мазер H18. Это говорит о том, что обновленная схема измерений для сравнений частот ОСЧ и микроволнового хранителя, в которой для преобразования частоты f_{rep} и измерений используется синтезатор с высоким разрешением и компаратор с узкой (~3 Гц) полосой пропускания, имеет уровень шумов, не превышающий собственные шумы мазера.

3. Результаты

На рис.5 и 6 представлены значения СКДО при измерениях частоты ОСЧ относительно частоты мазера H18, выполненных с помощью частотомера и фазового компаратора. Есть несколько источников шума, которые могут влиять на величину случайной погрешности при таких частотных измерениях. Для их демонстрации на рис.5 приведено значение СКДО (Sr/H18) при измерениях частоты ОСЧ на атомах ^{87}Sr на основе нашей ранее используемой измерительной системы с применением частотомера. В области времен измерения 1 – 10 с СКДО (Sr/H18) начинается со значения $\sim 4 \times 10^{-13}$ (шум частотомера) и спадает по закону $1/\tau$. Второй источник шума можно обнаружить в области времен измерения 200 – 1000 с, в которой спад СКДО (Sr/H18) сменяется подъемом, вызванным вариациями температуры в оптической лаборатории. Этот шум устраняется при помещении всех важных частей измерительной системы в камеру с постоянными климатическими условиями. Для демонстрации этого на рис.6 приведено СКДО (Sr/H18) при измерениях частотомером с помощью нашей новой измерительной системы, в которой частотомер был помещен в такую камеру.

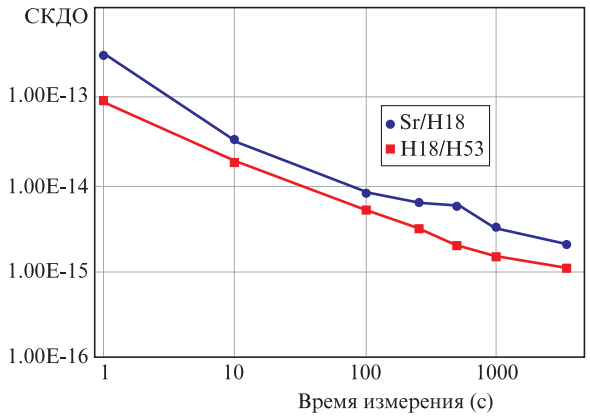

Рис.5. Девиация Аллана частоты ОСЧ на основе ^{87}Sr (круги), измеренная частотомером вне камеры постоянных климатических условий, и сличение частот двух Н-мазеров с использованием волоконно-оптической линии протяженностью 1.3 км с помощью фазового компаратора (квадраты).

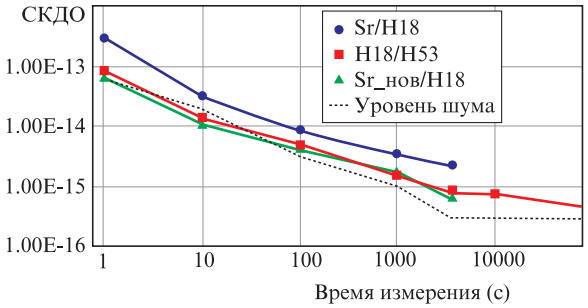

Рис.6. Девиация Аллана частоты ОСЧ на основе ^{87}Sr, измеренная частотомером (круги) и фазовым компаратором (треугольники), сличение частот двух Н-мазеров с использованием волоконно-оптической линии протяженностью 1.3 км (квадраты), а также уровень шума компаратора (пунктир). Частотомер и фазовый компаратор расположены в камере с постоянными климатическими условиями.

Из рис.6 также видно, что случайная погрешность результатов измерений (Sr_нов/H18), полученных с помощью фазового компаратора в новой измерительной системе сравнения частот ОСЧ на атомах ^{87}Sr и мазера H18, определяется шумами мазера H18. Это подтверждается тем, что представленная на рис.6 случайная погрешность измерений (H18/H53) при сличениях частот мазеров H18 и H53 и случайная погрешность измерений (Sr_нов/H18) при сравнениях частот ОСЧ и мазера H18 практически совпадают. Представленные здесь же результаты сравнения частот ОСЧ и мазера H18, полученные с помощью фазового компаратора в новой измерительной системе (Sr_нов/H18), имеют меньшую в 2 – 4 раза случайную погрешность, чем у результатов (Sr/H18), полученных по старой схеме с помощью частотомера. Следовательно, новая измерительная система на основе фазового компаратора дает меньший вклад в статистическую неопределенность u_{A} при сравнениях частот ОСЧ на атомах ^{87}Sr и водородных хранителей, входящих в состав эталона ГЭТ 1-2018.

4. Заключение

В настоящей работе мы представили описание состава аппаратного комплекса Государственного первичного эталона ГЭТ 1-2018, обновленный порядок формирования шкалы времени и новую схему измерений частоты ОСЧ [16, 17], а также результаты этих измерений. Реализована новая схема проведения сравнений частот оптического стандарта на атомах ^{87}Sr с частотами микроволновых хранителей времени и частоты и первичных цезиевых стандартов. Выполненные по этой схеме измерения характеризуются СКДО, спадающим как $1/\tau^{1/2}$ при временах измерения 1 – 3600 с, и уровнем, который определяет-

ся не оптическим стандартом, а присущ наилучшим водородным мазерам. В 2022 г. должен быть утвержден новый Государственный эталон времени и частоты РФ, в аппаратурный состав которого будут введены три оптических стандарта времени и частоты на основе использования холодных атомов стронция, что, несомненно, повысит уровень метрологических характеристик атомных шкал времени, формируемых на его основе.

1. Riehle F., Gill P., Arias F., Robertsson L. *Metrologia*, **55**, 188 (2018).
2. https://www.bimp.org/utils/en/pdf/CCTF-strategy-document.pdf; https://www.bimp.org/en/commettees/cg/cgpm/26-2018/resolution-1.
3. Gu´ena J., Abgrall M., Clairon A., Bize S. *Metrologia*, **51**, 108 (2014).
4. Nemitz N., Nemitz N., Gotoh T., Nakagawa F., Ito H., Hanado Y., Ido T., Hachisu H. *Metrologia*, **58** (2), 025006 (2021).
5. Tanabe T., Akamatsu D., Kobayashi T., Takamizawa A., Yanagimachi S., Ikegami T., SuzuyamaT., Inaba H., Okubo S., Yasuda M., Hong F.-L., Onae A., Hosaka K. *J. Phys. Soc. Japan*, **84**, 115002 (2015).
6. Lin Y.-G. et al. *Chin. Phys. Lett*., **32**, 090601 (2015).
7. Grebing C. et al. *Optica*, **3**, 563 (2016).
8. Hachisu H., Petit G., Nakagawa F., Hanado Y., Ido T. *Opt. Express*, **25**, 8511 (2017).
9. *Report of the 21st Meeting (8-9 June 2017) to the International Committee for Weights and Measures* (CCTF, 2017, p. 49).
10. Weyers S., Bauch A., Hubner U., Schroder R., Tamm Ch. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **47**, 432 (2000).
11. Levi F., Lorini L., Calonico D., Godone A. *IEEE Trans. Instrum. Meas*., **52**, 267 (2003).
12. Fang F., Mingshou L., Pingwei L., Weiliang C., Nianfeng L., Yige L., Ping W., Kun L., Rui S., Tianchu Li. *Metrologia,* **52**, 454 (2015).
13. https://www.bipm.org/en/bipm-services/timescales/time-ftp/Circular-T.html.
14. Donley E.A., Heavner T.P., Tataw M.O., Levi F., Jefferts S.R.. *Proc. IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition* (Montreal, Canada, 2004, pp 82 – 86).
15. Guena J., Abgrall M., Rovera D., Laurent P., Chupin B., Lours M., Santarelli G., Rosenbusch P., Tobar M.E., Li R., Gibble K., Clairon A., Bize S. *Progress in Atomic Fountains at LNE-SYRTE*; arXiv:1204.3621v1, 2012.99.
16. Сутырин Д.В., Бердасов О.И., Антропов С.Ю., Грибов А.Ю., Балаев Р.И., Стельмашенко Е.Ф., Федорова Д.М., Малимон А.Н., Слюсарев С.Н. *Квантовая электроника*, **49** (2), 199 (2019) [*Quantum Electron*., **49** (2), 199 (2019)].
17. Бердасов О.И., Грибов А.Ю., Белотелов Г.С., Пальчиков В.Г., Стрелкин С.А., Хабарова К.Ю. *Квантовая электроника*, **47** (5), 400 (2017) [*Quantum Electron*., **47** (5), 400 (2017)]; https://doi.org/10.1070/QEL16346.
18. Бердасов О.И., Сутырин Д.В., Стрелкин С.А., Грибов А.Ю., Белотелов Г.С., Костин А.С., Колачевский Н.Н., Слюсарев С.Н. *Квантовая электроника*, **48** (5), 431 (2018) [*Quantum Electron*., **48** (5), 431 (2018)].
19. Lodewyck J. et al. *Metrologia*, **53**, 1123 (2016).
20. Донченко С.И. и др. *Измерительная техника*, № 1, 35 (2020).
21. Беляев А.А., Демидов Н.А., Медведев С.Ю., Пастухов А.В., Сахаров Б.А., Блинов И.Ю. *Вестник Метролога*, №2, 14 (2015).
22. ГОСТ 8.567-2014 «Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения времени и частоты. Термины и определения».
23. https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/Circular-T/.
24. Gribov A. et al. *2020 Proc. IEEE International Frequency Control Symposium and International Symposium on Applications of Ferroelectrics (IFCS-ISAF)* (Keystone, CO, USA, 2020, pp 1–4); https://doi.org/10.1109/IFCS-ISAF41089.2020.9234906.
25. Katori H., Takamoto M., Pal'chikov V.G., Ovsiannikov V.D. *Phys. Rev. Lett*., **91** (17), 173005 (2003); https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.173005.