

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук

На правах рукописи

Кудеяров Константин Сергеевич

**Передача ультрастабильных сигналов оптической
частоты с активной компенсацией фазовых шумов**

Специальность 1.3.19 —
Лазерная физика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН.

Научный руководитель: **доктор физико-математических наук
Хабарова Ксения Юрьевна**

Официальные оппоненты: **Тайченачев Алексей Владимирович,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН,
главный научный сотрудник Федерального
государственного бюджетного учреждения науки
Института лазерной физики Сибирского
отделения Российской академии наук (ИЛФ
СО РАН)**

**Афанасьев Антон Евгеньевич,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Федерального
государственного бюджетного учреждения науки
Института спектроскопии Российской
академии наук (ИСАН)**

Ведущая организация: **Федеральное государственное унитарное
предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических
и радиотехнических измерений» (ФГУП
«ВНИИФТРИ»)**

Защита состоится 2 октября 2023 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.1.262.01 на базе Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, а также на сайте института www.lebedev.ru.

Автореферат разослан «__» 2023 г..

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.262.01,
доктор физико-математических наук

А. С. Золотько

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Наше понимание природы во многом базируется на понятии времени, необходимом для описания длительности физических процессов и последовательности событий. Идея использования частот атомных переходов для измерения времени, предложенная еще в девятнадцатом столетии Д. Максвеллом и У. Томсоном, была реализована в середине прошлого века. Создание атомных часов [1] сделало время и частоту наиболее точно измеримыми физическими величинами. С 1967 года в Международной системе СИ единица измерения времени - секунда - определяется по частоте перехода между уровнями сверхтонкой структуры в атомах цезия, лежащей в микроволновом диапазоне [2].

Ультрастабильные сигналы частоты и времени, генерируемые при помощи атомных часов, находят широкое применение как в научных, так и в технологических областях. Бортовые стандарты частоты играют важнейшую роль в функционировании глобальных спутниковых навигационных систем [3]. Среди других значимых приложений - формирование международных шкал времени [4], геодезия [5], проверка фундаментальных научных теорий [6; 7], биржевая торговля [8].

Существенное улучшение точности и стабильности атомных часов стало возможным благодаря использованию переходов оптического диапазона. Долгое время этому препятствовала невозможность измерения оптической частоты с необходимой точностью, однако создание фемтосекундных частотных гребенок разрешило данную проблему [9]. За последние двадцать лет прогресс в данной области привел к разработке оптических часов, точность и стабильность которых достигает нескольких единиц девятнадцатого знака [10; 11], что превосходит показатели первичного стандарта частоты (цециевых часов) более, чем на два порядка. Уже сегодня частоты десяти переходов оптического диапазона рекомендованы для использования в качестве вторичных стандартов частоты [12], в ближайшие годы может быть произведено переопределение секунды в системе единиц СИ [13; 14].

Важную роль в прогрессе оптических часов сыграло создание узкополосных лазерных источников [15], излучение которых само по себе является сигналом частоты высокой стабильности. Стабилизация частоты лазера по моде высокодобротного резонатора Фабри-Перо позволяет достигать относительной нестабильности частоты порядка 10^{-16} и ниже на временах усреднения 1-1000 с [16–18]. Высокостабильные лазеры необходимы для прецизионной спектроскопии [19] и детектирования гравитационных волн [20]; в последние годы они находят все более широкое применение в области квантовых вычислений при манипуляции оптическими кубитами в одиночных ионах [21; 22].

Для определения характеристик оптического стандарта частоты или лазерной системы требуется сличение нескольких высокостабильных осцилляторов между собой, что подразумевает доставку их сигналов в одно и то же место с сохранением характеристик. Так как осцилляторы могут находиться на удалении в сотни километров друг от друга, данная задача является нетривиальной. Практическое применение высокостабильных сигналов частоты также зачастую требует наличия каналов для их передачи. При передаче сигналов микроволновых стандартов частоты широко используются спутниковые методы. Однако вносимая ими в процессе передачи относительная погрешность частоты даже в лучшем случае составляет около 10^{-16} , что не позволяет полностью использовать потенциал современных оптических часов [23; 24]. Развитие оптических стандартов в начале 2000-х годов сразу же повлекло за собой разработку технологий для распространения ультрастабильных сигналов оптической частоты.

Наиболее распространенным каналом для передачи оптических сигналов частоты являются оптоволоконные линии связи, что позволяет использовать для данных целей масштабную и разветвленную телекоммуникационную инфраструктуру [25]. На данный момент ведется активная работа над созданием оптоволоконных сетей для распространения высокостабильных сигналов различного масштаба - от кампусных до континентальных [26–28]. Тем не менее, волоконные каналы могут быть использованы только при наличии необходимой инфраструктуры и не позволяют осуществлять связь с подвижными объектами. Разработка методов передачи оптических сигналов по атмосферным каналам позволит решить проблему «последней мили» [29, с. 16] и реализовать связь с орбитальными космическими аппаратами [30]. При распространении по любому типу каналов под влиянием факторов окружающей среды в высокостабильный сигнал вносятся фазовые шумы. Для сохранения характеристик сигнала при доставке его к удаленному пользователю необходимо создание системы детектирования и активной компенсации шумов [31].

В России ведется активная работа по созданию оптических частотных стандартов, как в стационарных конфигурациях, так и в транспортируемых, что в перспективе позволит создать новое поколение бортовых стандартов спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС. Два оптических рефера частоты на холодных атомах стронция-87, разработанные в национальном метрологическом институте ВНИИФТРИ, включены в состав Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени (ГЭТ-1) [32]. Также ВНИИФТРИ ведет разработку транспортируемого стандарта на нейтральных атомах иттербия [33]. В Институте лазерной физики (ИЛФ) ведутся работы над оптическими часами на холодных атомах магния [34] и одиночном ионе иттербия [35; 36].

В ФИАН проводится разработка оптических часов на нейтральных атомах туния с ожидаемой систематической погрешностью менее 10^{-17} [37–39] и компактных часов на одиночном ионе иттербия с систематической погрешностью и долговременной нестабильностью на уровне 5×10^{-16} [40; 41]. Создан ряд ультрастабильных лазерных систем с шириной спектра на уровне 1-10 Гц: на телекоммуникационной длине волн 1550 нм со стабилизацией по кремниевому криогенному резонатору [42–44] и по компактному резонатору ULE [45], на длинах волн 1140 нм [46], 698 нм [47; 48], 871 нм [49], соответствующих метрологическим переходам в атомах туния и стронция, ионах иттербия.

Тем не менее, развитие методов передачи высокостабильных сигналов в России до последнего времени ограничивалось работами научной группы ВНИИФТРИ, посвященных передаче сигналов микроволновых стандартов на оптической несущей по оптоволоконным линиям [50–53]. Становится очевидной необходимость развития технологий и инфраструктуры для передачи сигналов именно оптических осцилляторов с сохранением их метрологических характеристик, как для характеристизации, так и для использования в различных приложениях. Этому вопросу посвящена данная работа.

Целью данной работы является совершенствование методов передачи сигналов оптической частоты на большие расстояния по оптоволоконным и атмосферным каналам с сохранением их метрологических характеристик на уровне 18-го знака.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Теоретическое и экспериментальное исследование характеристик фазовых шумов, вносимых оптоволоконными и атмосферными каналами передачи в сигнал оптической частоты.
2. Разработка и создание систем передачи сигналов оптической частоты по оптоволоконным и атмосферным каналам с активной компенсацией фазовых шумов, позволяющих снизить вклад шумов канала в относительную нестабильность частоты до уровня менее 10^{-18} на времени усреднения более 1000 с.
3. Исследование характеристик системы компенсации шумов при передаче сигнала оптической частоты по каналам разной длины, в том числе при воздействии внешних возмущений.
4. Выполнение сличения нескольких ультрастабильных лазерных систем с использованием активно-стабилизированных каналов передачи и фемтосекундного генератора оптических частот; определение нестабильности частоты каждого из лазеров на временах усреднения 0.01-100 с с погрешностью не более 50%.

Научная новизна. Впервые проведено исследование фазовых шумов, вносимых в сигнал оптической частоты, передаваемый по волоконной

линии, при воздействии на оптоволокно искусственно возбуждаемых механических вибраций с частотами в диапазоне 5–90 Гц. При помощи системы активной компенсации продемонстрировано подавление вносимых вибрациями шумов не менее, чем на 55 дБ.

Для системы активной компенсации фазовых шумов разработана, создана и исследована новая конфигурация интерферометра с активной термостабилизацией и виброизоляцией, позволяющая снизить вклад собственных шумов интерферометра в нестабильность передаваемого сигнала оптической частоты до значения менее 10^{-19} на временах усреднения более 200 с.

Совместное применение систем активной компенсации фазовых шумов и флуктуаций направления пучка позволило впервые продемонстрировать передачу излучения непрерывного лазера по турбулентному ($C_n^2 = 4 \times 10^{-15}$) атмосферному каналу с вносимой относительной нестабильностью частоты менее $2 \times 10^{-16}/\tau$ без потери когерентности фазы на протяжении 3 часов.

Практическая значимость. Впервые в России разработана и создана система передачи высокостабильных сигналов оптической частоты, позволяющая детектировать и компенсировать вносимые каналом передачи фазовые шумы. Система позволяет передавать сигналы по оптоволоконным и атмосферным каналам с вносимой относительной нестабильностью частоты ниже 10^{-18} на временах усреднения более 300 с.

Стабилизированные волоконные линии могут быть использованы для соединения блоков прецизионных экспериментальных установок, для сличения высокостабильных осцилляторов, расположенных в удаленных друг от друга лабораториях, а также для задач прецизионной спектроскопии, геодезии, телекоммуникаций, проверки фундаментальных научных теорий, астрономических и сейсмологических измерений. Результаты исследований передачи ультрастабильных сигналов по атмосферным линиям могут быть использованы для задач высокоточной синхронизации частот на объектах, не обеспеченных волоконной инфраструктурой, а также для разработки перспективной системы передачи с подвижными ретрансляторами, расположенными на БПЛА или космических аппаратах. Создание подобной системы позволит осуществлять сличение транспортируемых стандартов частоты.

Сличение высокостабильных лазерных систем необходимо для использования данных систем в прецизионных спектроскопических экспериментах. Исследованные характеристики лазерных систем оказывают влияние на показатели стабильности оптических часов на атомах туния и на достоверность операций ионного квантового вычислителя. Созданная в ходе работы сеть стабилизированных оптоволоконных линий между лабораториями ФИАН может быть использована для дальнейших сличений

при проведении работ по усовершенствованию высокостабильных лазерных систем и оптических часов.

Методология и методы исследования. Детектирование фазовых шумов, вносимых каналами передачи в оптический сигнал, осуществлялось при помощи методов гетеродинной интерферометрии. Для сличения ультрастабильных лазерных систем использовался метод «треуголки». Экспериментальные результаты аппроксимировались теоретическими моделями, и вычислялись необходимые параметры.

Положения, выносимые на защиту:

1. Активная компенсация фазовых шумов оптоволоконного канала ближнего инфракрасного диапазона длиной до 2.85 км обеспечивает снижение вносимых ими искажений в оптическую частоту передаваемого сигнала до относительного уровня ниже, чем 2×10^{-19} при времени усреднения более 1000 с.
2. Атмосферный оптический канал телекоммуникационного диапазона длиной до 17 м с системой активной компенсации фазовых шумов и флуктуаций направления пучка вносит в сигнал оптической частоты относительную нестабильность не более 1.7×10^{-19} при времени усреднения 1000 с.
3. Использование активно-стабилизированных волоконных линий длиной до 100 м, фемтосекундного генератора оптических частот и метода «треуголки» для сличения ультрастабильных лазерных систем на длинах волн 1550 нм, 1140 нм и 871 нм позволяет определить относительную нестабильность частоты каждой из систем с внесением искажений на уровне не более 2.2×10^{-16} на времени усреднения 1 с и не более 2×10^{-18} на времени усреднения 100 с.

Достоверность результатов работы обеспечивается повторяемостью экспериментальных данных, в частных случаях - согласованностью с данными, представленными в публикациях других авторов, а также использованием поверенного прецизионного измерительного оборудования.

Личный вклад. Автором лично была собрана и отлажена экспериментальная установка для исследования передачи сигналов оптической частоты по оптоволоконным линиям, включающая лазерную систему, систему детектирования и компенсации шумов, оборудование для измерения характеристик сигнала; проведены экспериментальные исследования передачи сигналов оптической частоты по оптоволоконным линиям различной длины, в том числе, в условиях воздействия на волоконный канал искусственно возбуждаемых механических вибраций.

Автором разработана экспериментальная установка для исследования передачи сигнала оптической частоты по атмосферным каналам, включая новую конфигурацию интерферометра для системы компенсации фазовых шумов, системы активной компенсации флуктуаций направления

пучка и наведения на движущийся объект. Сборка, отладка и исследование работы данных систем проводились при личном участии автора.

Автор принимал активное участие в проведении сличения трех высокостабильных лазерных систем с использованием стабилизированных волоконных каналов. Обработка и анализ всех результатов измерений, приведенных в диссертации, выполнены лично автором.

Апробация работы. Основные результаты работы были лично представлены автором на 7 международных и российских конференциях: International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO), 26-30.09.2016, г. Минск, Беларусь; 59-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 21–26.11.2016, г. Москва, Россия; III Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии», 24-27.01.2017, г. Москва, Россия; IV International Conference on Quantum Technologies (ICQT), 12-16.07.2017, г. Москва, Россия; VI International Conference on Quantum Technologies (ICQT), 12-16.07.2021, г. Москва, Россия; XI семинар Д.Н.Клышко, 8-10.06.2022, г. Москва, Россия; VI International Conference on Ultrafast Optical Science «UltrafastLight-2022», 3-7.10.2022, г. Москва, Россия.

Цикл работ «Передача высокостабильных сигналов оптической частоты по волоконным и открытым каналам с компенсацией фазовых шумов» авторов Кудеярова К. С., Жаднова Н. О. и Крючкова Д. С. получил диплом победителя конкурса молодежных научных работ ФИАН 2022 года (премия им. П.Н. Лебедева).

Публикации по теме диссертации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 публикациях, 4 из которых изданы в периодических научных журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus, 2 - в сборниках трудов конференций. Зарегистрирован 1 патент. Ссылки на публикации приведены на стр. 20–21.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 130 страниц, включая 63 рисунка и 4 таблицы. Список литературы содержит 230 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи, излагаются научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава имеет обзорный характер. В разделе 1.1 рассматриваются важнейшие термины и характеристики, используемые для описания сигналов частоты: точность, стабильность, девиация Аллана, спектральная плотность мощности фазовых шумов. Описаны экспериментальные методы

исследования характеристики сигнала частоты: гетеродинирование, измерение частоты при помощи счетчиков в различных режимах. В разделе 1.2 приведены краткие сведения о наиболее распространенных генераторах ультрастабильных сигналов частоты микроволнового и оптического диапазона.

В разделе 1.3 приводится описание спутниковых методов, используемых для передачи сигналов частоты микроволнового диапазона - приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем и дуплекса. На рис. 1 приведена относительная нестабильность частоты, вносимая при передаче данными методами в сравнении с характеристиками наиболее распространенных частотных стандартов. Нестабильность, вносимая спутниковыми методами, достигает нескольких единиц шестнадцатого знака на времени усреднения около суток, что не подходит для передачи сигналов оптических часов, демонстрирующих нестабильность на уровне восемнадцатого знака на временах усреднения около часа.

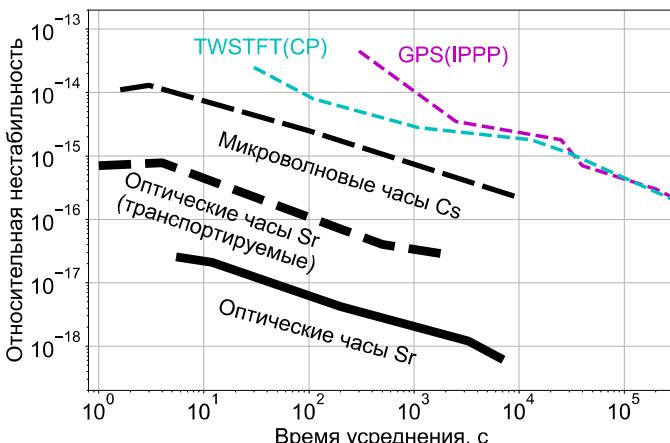


Рис. 1 — Относительная нестабильность частоты, вносимая спутниковыми методами передачи, в сравнении с показателями различных стандартов частоты. GPS(IPPP) - протокол IPPP с приемом сигналов системы GPS [23], TWSTFT(CP) - дуплекс с детектированием фазы несущей [24], Cs - цезиевый фонтан [54], Sr - оптические часы на атомах стронция в стационарном [11] и транспортируемом [55] вариантах.

В разделе 1.4 рассматривается метод передачи, при использовании которого в качестве сигнала используется фаза излучения непрерывного лазера. При прохождении оптического излучения по каналу длиной L с эффективным показателем преломления n сигнал на несущей частоте ν_0

приобретает фазу

$$\phi_{link} = \frac{2\pi\nu_0}{c} nL. \quad (1)$$

Различные физические процессы могут привести к флуктуациям величин n и L , а значит, к флуктуациям мгновенной частоты переданного сигнала:

$$\Delta\nu_{link} = \frac{d\phi_{link}}{dt}. \quad (2)$$

В работе рассматриваются различные методы компенсации фазовых шумов, необходимой для сохранения метрологических характеристик передаваемого сигнала. Наиболее распространенным из них, применяемым, в том числе, в данной работе, является активная компенсация, принципиальная схема которой приведена на рис. 2. Детектирование вносимых каналом шумов осуществляется при помощи интерферометрической схемы: часть передаваемого сигнала отражается получателем обратно и гетеродинируется с сигналом, прошедшим через короткое опорное плечо. Гетеродинный сигнал содержит информацию о внесенных каналом передачи шумах и используется в петле обратной связи, которая компенсирует фазовые сдвиги при помощи акусто-оптического модулятора.

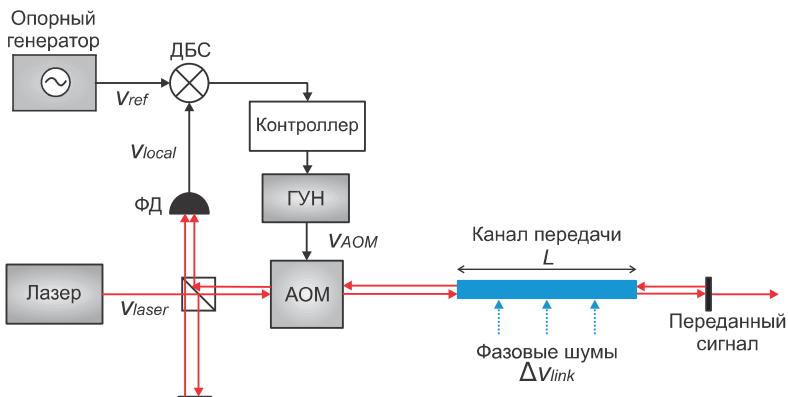


Рис. 2 — Схема активной компенсации фазовых шумов при передаче оптического сигнала частоты. ФД - фотодетектор, АОМ - акусто-оптический модулятор, ГУН - генератор, управляемый напряжением, ДБС - двойной балансный смеситель.

Далее рассматриваются экспериментальные схемы, позволяющие характеризовать вносимые каналом передачи шумы, и различные факторы, которые могут ограничивать эффективность активной компенсации фазовых шумов: задержка, связанная с временем распространения сигнала

по каналу передачи, воздействие внешней среды на некомпенсируемые части схемы, отличие длин оптических путей при распространении света в прямом и обратном направлении (невзаимность канала), шумы фотодетектора, лазерного источника и опорного радиочастотного сигнала. Приводятся выражения для оценки воздействия каждого из упомянутых факторов.

В разделе 1.5 рассмотрены важнейшие варианты применения каналов передачи высокостабильных сигналов частоты: прецизионная спектроскопия, релятивистская геодезия, радиоинтерферометрия, проверка фундаментальных теорий, повышение надежности квантовых и классических каналов связи, сенсорика.

Вторая глава посвящена исследованию передачи сигналов оптической частоты по оптоволоконным линиям связи.

В разделе 2.1 рассматриваются свойства оптического волокна. Приводятся сведения о его типах, величине коэффициента затухания оптического излучения. Обсуждаются причины возникновения и величина фазовых шумов, вносимых волоконной линией в оптический сигнал.

Фазовые шумы возникают из-за воздействия на длину оптического пути флуктуаций температуры, давления и относительной влажности. С учетом коэффициентов чувствительности к различным типам внешних воздействий произведена оценка величины шумов, вносимых волоконной линией длиной 5 м в сигнал на длине волны 1550 нм. Изменение температуры на 1 К за 1 час (что может соответствовать работе системы кондиционирования) может приводить к сдвигу частоты около 10 мГц (т.е. к относительному сдвигу частоты 5×10^{-17}). Воздействие акустических вибраций на частоте 200 Гц при звуковом давлении 60 дБ (громкий разговор) может приводить к смещению частоты около 160 мГц (относительный сдвиг частоты -8×10^{-16}). Таким образом, даже короткие линии в лабораторных условиях могут ухудшать характеристики сигналов оптических часов. Для длинных оптоволоконных каналов при воздействии случайных блужданий температуры зависимость вносимой нестабильности от длины канала L и времени усреднения τ примет вид $\sigma_{link} \propto \sqrt{L/\tau}$.

Причиной возникновения невзаимности оптоволоконного канала может быть хроматическая и поляризационно-модовая дисперсия, самомодуляция фазы излучения. Приведенные в работе оценки показывают, что величина данных эффектов на несколько порядков меньше, чем шумы канала без активной компенсации, поэтому в большинстве случаев ими можно пренебречь.

В разделе 2.2 рассматривается мировой опыт использования волоконных линий для передачи высокостабильных сигналов. Приводятся сведения о стабилизированных волоконных каналах, соединяющих ведущие мировые метрологические институты, обсуждаются достигнутые с их помощью результаты. Отмечается, что в России до настоящего момента

исследовалась передача только радиочастотных сигналов частоты на оптической несущей.

В разделе 2.3 приводятся результаты экспериментальных исследований передачи сигнала на длине волны 1140 нм по волоконным линиям разной длины, проведенные в ФИАН. Экспериментальная установка включала в себя оптическую интерферометрическую схему, электронную петлю обратной связи и счетчик частоты для анализа вносимых в сигнал шумов. В ходе исследования определено, что короткие каналы (длиной 5 м), используемые для соединения частей экспериментальной установки, могут вносить в сигнал нестабильность на уровне $10^{-16} - 10^{-14}$ на временах усреднения $\tau = 0.01 - 850$ с. Продемонстрировано, что использование активной компенсации фазовых шумов позволяет снизить вклад шумов такого канала в относительную нестабильность частоты сигнала до уровня $6 \times 10^{-17}/\tau$.

Продемонстрировано, что для активной компенсации фазовых шумов длина когерентности передаваемого сигнала должна существенно превосходить длину канала передачи. На рис. 3 приведены результаты исследований передачи излучения ультрастабильного лазера (длина когерентности около 20 000 км) по оптоволоконному каналу длиной 2.85 км.

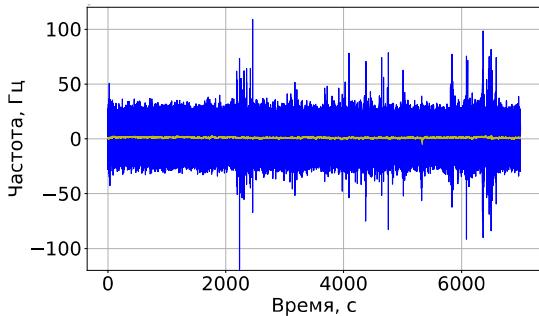
Без компенсации шумов на временах усреднения 1-1000 с в нестабильности частоты наблюдалось «плато» на уровне 10^{-15} . При наличии активной компенсации относительная нестабильность достигала значения 2×10^{-19} на временах усреднения более 1000 с, что позволяет передавать сигналы оптических часов с сохранением метрологических характеристик. Приведена оценка влияния различных факторов на остаточные шумы канала передачи.

Также исследована работа системы активной компенсации шумов при воздействии на волоконную линию искусственно возбуждаемых механических вибраций с частотами 5–90 Гц. Продемонстрировано, что для всех частот возмущения в исследованном диапазоне система способна компенсировать фазовые шумы с величиной спектральной плотности мощности более 2×10^2 рад²/Гц, обеспечивая их подавление не менее, чем на 55 дБ.

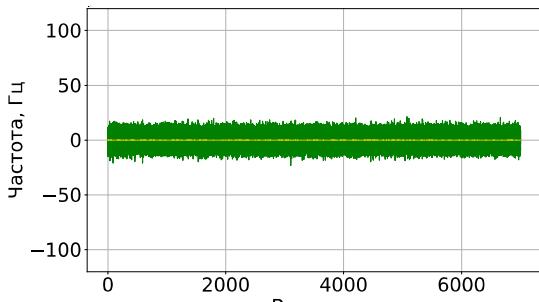
Третья глава посвящена исследованию передачи оптических сигналов по атмосферным каналам, использование которых может позволить осуществлять связь с транспортируемыми стандартами частоты.

В разделе 3.1 представлено описание физических свойств атмосферных каналов: пространственных особенностей распространения оптического сигнала, коэффициента затухания, фазовых шумов. Приведено краткое описание теории оптической турбулентности, обуславливающей частотную зависимость вносимых каналом шумов. В инерциальном диапазоне частот спектральная плотность мощности фазовых шумов описывается спектром Колмогорова:

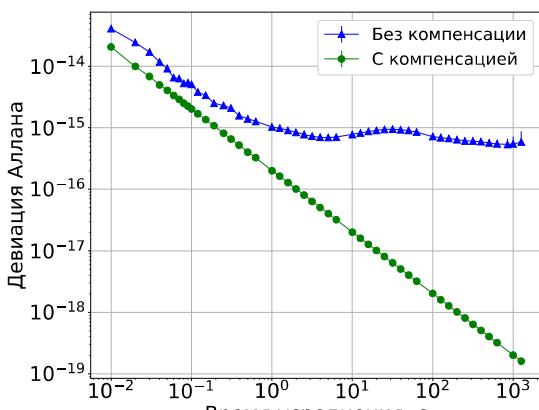
$$S_\phi(f) = 0.016 C_n^2 k^2 L V_\perp^{5/3} f^{-8/3}, \quad (3)$$



а)



б)



в)

Рис. 3 — Шумы частоты (а, б) и относительная нестабильность частоты (в), внесенные в сигнал оптической частоты одномодовым волокном длиной 2.85 км без компенсации шумов (синий) и с активной компенсацией (зеленый). Желтый — усредненные за 1 с данные.

где C_n^2 - структурная постоянная показателя преломления, характеризующая силу турбулентности, k - волновое число, L - длина канала, V_{\perp} - перпендикулярная каналу компонента средней скорости ветра. Также рассмотрены другие эффекты оптической турбулентности: флуктуации направления оптического пучка, интенсивности, ограничение поперечной когерентности. Произведен расчет диаметра поперечной когерентности (параметра Фрида) в зависимости от длины канала передачи и силы турбулентности.

В разделе 3.2 представлен текущий прогресс, достигнутый в области передачи сигналов оптической частоты по атмосферным каналам, рассмотрены два метода: оптический дуплекс и передача излучения непрерывного лазера. В качестве объекта исследования выбран последний, что обосновывается его универсальностью и отсутствием необходимости использовать сложное и дорогостоящее оборудование.

В разделе 3.3 представлены результаты экспериментальных исследований атмосферных оптических каналов в ФИАН. Приведены результаты исследования передачи сигнала на длине волны 1550 нм по лабораторному каналу длиной 5 м и реальному турбулентному атмосферному каналу длиной 17 м. Определено, что основными проблемами, препятствующими эффективной компенсации шумов, а также анализу воздействия оптической турбулентности, являлись: 1) высокая чувствительность опорного плеча интерферометра (и других некомпенсируемых частей схемы) к флуктуациям температуры; 2) в случае атмосферного канала - нестабильность амплитуды принимаемого сигнала, возникающая из-за флуктуаций направления оптического пучка и не позволяющая осуществлять передачу сигнала с сохранением фазовой когерентности достаточно долго.

Для решения первой из этих проблем была разработана новая конфигурация виброизолированного и термостабилизированного интерферометра, что позволило снизить вклад собственных шумов системы передачи в нестабильность до 2×10^{-19} на временах усреднения более 200 с. Разработанный интерферометр зарегистрирован в качестве полезной модели.

Чтобы устранить влияние флуктуаций направления пучка, была создана система активной компенсации. Детектирование флуктуаций направления осуществлялось с помощью квадратного фотодетектора, подстройка направления - с помощью двухкоординатного зеркала с гальваническим управлением. На рис. 4 приведена диаграмма рассеяния положений пучка на квадратном фотодетекторе. При использовании активной компенсации среднеквадратичное отклонение пучка от центрального положения существенно снизилось.

После доработки системы было повторно проведено исследование передачи оптического сигнала частоты по атмосферному каналу длиной 17 м. Была продемонстрирована передача сигнала с активной компенсацией

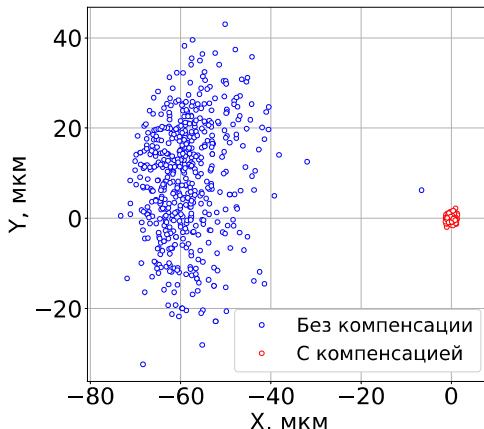
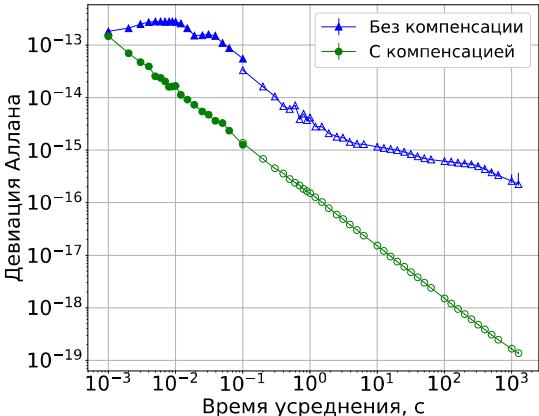


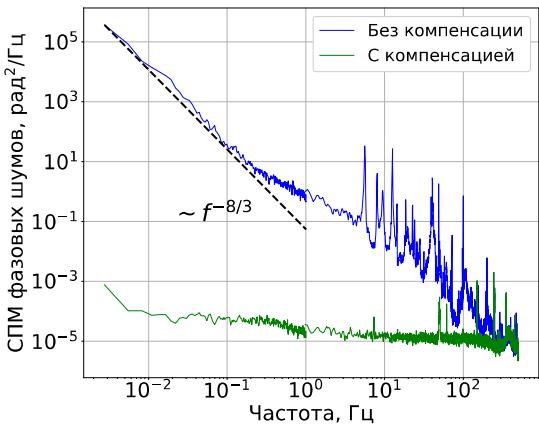
Рис. 4 — Положение оптического пучка на квадратном фотодетекторе при передаче сигнала по атмосферному каналу длиной 17 м без активной компенсации флуктуаций направления пучка (синий) и при ее включении (оранжевый). Время одного измерения - 1 с, 500 измерений.

фазовых шумов и флуктуаций направления пучка без потери когерентности фазы на протяжении 183 минут. На момент проведения исследования и публикации его результатов такая длительность передачи излучения непрерывного лазера по турбулентному атмосферному каналу стала рекордной, что является важным результатом, несмотря на небольшую длину исследуемого канала. Характеристики вносимых каналом шумов приведены на рис. 5. Низкочастотная часть спектра близка к зависимости $f^{-8/3}$, то есть описывается спектром Колмогорова, что позволяет вычислить значение структурной постоянной показателя преломления для исследуемого канала, составившее $C_n^2 = 4 \times 10^{-15}$. Компенсация шумов позволила снизить вклад канала в относительную нестабильность передаваемого сигнала на времени усреднения 1000 секунд более чем в 1000 раз - с 2.6×10^{-16} до 1.7×10^{-19} . Значение шумов канала менее 10^{-18} , необходимое для передачи сигналов оптических часов, достигалось после усреднения в течение 160 с.

Также были проведены первичные исследования передачи сигнала с использованием подвижного отражателя. Для этого система передачи была установлена на двухкоординатную монтировку, что позволило продемонстрировать передачу сигнала с активной компенсацией фазовых шумов при движении отражателя в угловом диапазоне 3.15° . В дальнейшем результаты данного эксперимента могут быть использованы для создания сети атмосферных каналов с установкой ретрансляторов оптического сигнала на БПЛА или передачи оптических сигналов между спутниками и наземными станциями.



а) Девиация Аллана



б) Спектральная плотность мощности фазовых шумов. Чёрная штрихованная линия - аппроксимация спектром Колмогорова в частотном диапазоне 0-200 мГц

Рис. 5 — Характеристики шумов, внесенных в сигнал оптической частоты атмосферным каналом длиной 17 м. Синий - без активной компенсации шумов, зеленый - с активной компенсацией шумов.

В четвертой главе полученные результаты применяются для сличения ультрастабильных лазерных систем. Чтобы определить характеристики высокостабильного оптического осциллятора, требуется сличить его с другими осцилляторами. В случае, если исследуемые оптические сигналы имеют сильно отличающиеся длины волн, необходимо произвести перенос

стабильности из одного спектрального диапазона в другой с помощью фемтосекундной частотной гребенки, описание которой приводится в разделе 4.1. Приведено описание принципов их работы, различных схем сличения и переноса стабильности, а также шумов, которые могут вноситься в сигнал в ходе этой процедуры.

Для полной характеристизации в общем случае требуется сличение трех осцилляторов методом «треуголки», описанным в разделе 4.2. Приведены как классические формулы для прямого сличения трех осцилляторов, так и для случая, когда сличение проводится через фемтосекундный генератор оптических частот.

В разделе 4.3 приведено описание экспериментальной реализации сличения трех ультрастабильных лазерных систем, разработанных в ФИАН, с использованием стабилизированных оптоволоконных линий. В сличении участвовали две лазерные системы, разработанные непосредственно для прецизионной спектроскопии: система на длине волны 1140 нм, используемая для возбуждения магнито-дипольного перехода в атомах ^{169}Tm [38], и система на длине волны 871 нм, после удвоения частоты используемая для возбуждения электро-квадрупольного перехода с длиной волны 435.5 нм в ионах $^{171}\text{Yb}^+$ [49]. Обе системы представляют собой полупроводниковые лазеры, стабилизированные по резонаторам из стекла ULE. Третьей системой, участвующей в сличении, был волоконный эрбиевый лазер на телекоммуникационной длине волны 1550 нм, стабилизированный по резонатору из монокристаллического кремния.

Для проведения сличения три лаборатории, в которых располагались лазерные системы, были соединены стабилизированными волоконными линиями длиной 10–100 м, по которым излучение лазеров доставлялось к фемтосекундной гребенке (рис. 6). Ее частота повторений привязывалась по фазе к излучению лазера на длине волны 1140 нм, производилась запись частот биений других лазеров с ближайшими модами гребенки.

На рис. 7 приведены относительные нестабильности трех исследуемых лазеров, вычисленные методом «треуголки». Относительная нестабильность частоты лазеров 1550 нм, 1140 нм, 871 нм на времени усреднения 1 с составила $(1.56 \pm 0.03) \times 10^{-14}$, $(3.2 \pm 0.2) \times 10^{-15}$ и $(6.0 \pm 0.3) \times 10^{-15}$, соответственно. Проведенные оценки показывают, что шумы оптоволоконных каналов и фемтосекундной гребенки, вносимые в процессе сличения, не превышают 2.2×10^{-16} на времени усреднения 1 с и 2×10^{-18} на времени усреднения 100 с. Результаты сличения свидетельствуют о том, что лазеры 1140 нм и 871 нм могут использоваться для спектроскопии узких «часовых» оптических переходов без существенного уширения спектральных линий. Несмотря на то, что лазерная система нового типа на длине волны 1550 нм значительно уступает по характеристикам двум другим, ее использование в данном эксперименте позволило впервые выполнить детальный анализ их спектральных характеристик.

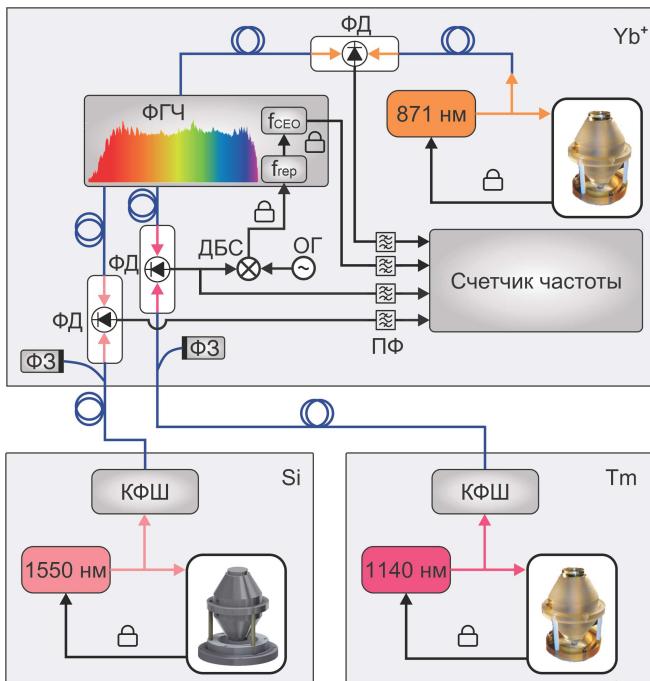


Рис. 6 — Схема сличения трех ультрастабильных лазеров в ФИАН. Все три лазера размещены в различных лабораториях (Yb^+ , Si, Tm), соединенных волоконными линиями. ФГЧ – фемтосекундная гребенка частот, f_{rep} – частота повторений гребенки, f_{CEO} – оффсетная частота гребенки, ФД – фотодетектор, ФЗ – фарадеевское зеркало, ДБС – двойной балансный смеситель, ОГ – опорный генератор, КФШ – модуль компенсации фазовых шумов, ПФ – полосовые фильтры. Замком обозначена фазовая привязка.

В разделе 4.4 приведены спектры узких метрологических переходов в атомах тулия ($4f^{13}6s^2(J = 7/2) \rightarrow 4f^{13}6s^2(J = 5/2)$) и ионе иттербия (${}^2S_{1/2} \rightarrow {}^2D_{3/2}$), измеренные с использованием исследованных лазеров 1140 нм и 871 нм. Ширины полученных спектральных линий составили 10 и 30 Гц, соответственно, что является фурье-ограничением для использованных времен возбуждения и указывает на то, что шумы лазеров не являются ограничивающим фактором. Отмечается значимость характеристикации лазерных систем для создания оптических часов на атомах тулия и квантового вычислителя на ионах иттербия.

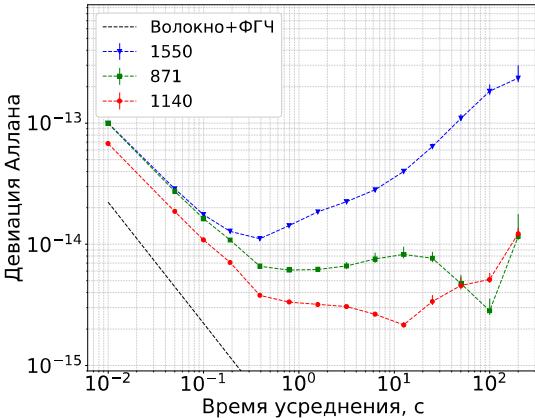


Рис. 7 — Относительная нестабильность частоты лазеров 1140 нм (красный), 1550 нм (синий) и 871 нм (зеленый), измеренные методом «треуголки» через фемтосекундную гребенку частот с использованием стабилизованных волоконных линий. Также приведена оценка шумов, вносимых волоконными каналами и фемтосекундной гребенкой частот в процессе сличения (черный).

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Продемонстрировано, что при передаче сигнала частоты на длине волны 1140 нм по поляризационно-поддерживающему волоконному каналу длиной 5 м в сигнал вносится относительная нестабильность $10^{-16} - 10^{-15}$ на временах усреднения $\tau = 0.01 - 850$ с, что препятствует передаче сигналов современных оптических часов с сохранением метрологических характеристик. Создана система активной компенсации фазовых шумов, позволяющая снизить вклад шумов канала в относительную нестабильность частоты сигнала до уровня $6 \times 10^{-17}/\tau$.
2. Продемонстрирована передача сигнала частоты на длине волны 1140 нм по одномодовому волоконному каналу длиной 2.85 км в условиях воздействия на волоконную линию искусственных механических колебаний в частотном диапазоне 5-90 Гц с активной компенсацией, обеспечивающей подавление вносимых колебаний фазовых шумов не менее 55 дБ. Относительная нестабильность частоты, вносимая каналом, составила $2 \times 10^{-16}/\tau$ на временах усреднения $\tau = 0.01 - 1000$ с и достигла значения 2×10^{-19} .
3. Реализована передача сигнала частоты на длине волны 1550 нм по атмосферному каналу длиной 17 м с активной компенсацией фазовых шумов, обеспечивающей относительную нестабильность частоты, вносимую каналом, 1.8×10^{-16} на времени усреднения 1 с

и 1.7×10^{-19} на времени усреднения 1000 с. Активная компенсация флуктуаций направления пучка обеспечила непрерывную передачу сигнала без потери когерентности фазы в течение 3 часов.

4. Для системы активной компенсации фазовых шумов создан температурно-стабилизированный виброизолированный интерферометр, позволяющий снизить чувствительность опорного плеча и других некомпенсируемых частей оптической схемы к внешним возмущениям. Продемонстрировано снижение вклада собственных шумов интерферометра в нестабильность передаваемого сигнала частоты до уровня менее 10^{-19} на временах усреднения более 200 с.
5. Три лаборатории соединены стабилизированными оптоволоконными линиями, что позволяет проводить сличение высокостабильных оптических осцилляторов с низким уровнем вносимых шумов. Методом «треуголки» с использованием фемтосекундного генератора оптических частот охарактеризованы лазерные системы на длинах волн 1550 нм, 1140 нм и 871 нм. Относительная нестабильность частоты лазеров на времени усреднения 1 с составила $(1.56 \pm 0.03) \times 10^{-14}$, $(3.2 \pm 0.2) \times 10^{-15}$ и $(6.0 \pm 0.3) \times 10^{-15}$, соответственно.

Публикации автора по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных журналах:

1. Хабарова К. Ю., Кудеяров К. С., Вишнякова Г. А., Колачевский Н.Н. «Короткая оптоволоконная линия связи с системой компенсации фазовых шумов для передачи сигналов оптической частоты» // Квантовая электроника. - 2017. - Т. 47, № 9. - С. 794–797.
2. Kudeyarov K. S., Vishnyakova G. A., Khabarova K. Yu. and Kolachevsky N. N. «2.8 km fiber link with phase noise compensation for transportable Yb⁺ optical clock characterization» // Laser Physics. - 2018. - Vol. 28, no. 10. - P. 105103.
3. Кудеяров К. С., Крючков Д. С., Вишнякова Г. А., Жаднов Н. О., Хабарова К. Ю., Колачевский Н.Н. «Передача сигнала частоты по высокостабильному открытому воздушному каналу» // Квантовая электроника. - 2020. - Т. 50, № 3. - С. 267–271.
4. Кудеяров К. С., Головизин А. А., Борисенко А. С., Жаднов Н. О., Заливако И. В., Крючков Д. С., Чиглинцев Э. О., Вишнякова Г. А., Хабарова К. Ю., Колачевский Н.Н. «Сличение трех ультрастабильных лазеров через фемтосекундную гребенку частот» // Письма в ЖЭТФ. - 2021. - Т. 114, № 5. - С. 243-249.

Публикации в сборниках трудов конференций:

1. Vishnyakova G. A., Kudeyarov K. S., Kryuchkov D. S., Zhadnov N. O., Khabarova K. Yu., Kolachevsky N. N. «Optical frequency transfer via an ultra-stable open-air short link» // Journal of Physics: Conference Series. - 2020. - Vol. 1692. - P. 012020.
2. Vishnyakova G. A., Kudeyarov K. S., Chiglintsev E. O., Zhadnov N. O., Kryuchkov D. S., Khabarova K. Yu., Kolachevsky N. N. «Ultra-Stable Atmospheric Short Link for the Optical Frequency Signal Transfer» // 2021 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), Gainesville, FL, USA. - 2021. - P. 1-3.

Патенты:

1. Кудеяров К. С., Вишнякова Г. А., «Устройство для приема и передачи оптического сигнала частоты с компенсацией фазовых шумов», патент на полезную модель RU 210347 U1 от 08.04.2022.

Список литературы

1. *Essen L., Parry J. V.* An atomic standard of frequency and time interval: A caesium resonator // Nature. — 1955. — Vol. 176, no. 4476. — P. 280—282. — DOI: 10.1038/176280a0.
2. *Bureau International des Poids et Mesures.* The International System of Units (SI), 9th Edition. — 2019. — URL: www.bipm.org/documents/20126/41483022/SI-Brochure-9-EN.pdf ; Доступ: 16.03.2023.
3. *Jaduszliwer B., Campano J.* Past, present and future of atomic clocks for GNSS // GPS Solutions. — 2021. — Vol. 25, no. 1. — P. 1—13. — DOI: 10.1007/s10291-020-01059-x.
4. *Bureau International des Poids et Mesures.* Circular T. — URL: www.bipm.org/en/time-ftp/circular-t ; Доступ: 16.03.2023.
5. Atomic clocks for geodesy / T. E. Mehlstäubler [et al.] // Reports on Progress in Physics. — 2018. — Vol. 81, no. 6. — P. 064401. — DOI: 10.1088/1361-6633/aab409.
6. Search for new physics with atoms and molecules / M. S. Safronova [et al.] // Reviews of Modern Physics. — 2018. — Vol. 90, no. 2. — P. 25008. — DOI: 10.1103/RevModPhys.90.025008.
7. Probing many-body interactions in an optical lattice clock / A. M. Rey [et al.] // Annals of Physics. — 2014. — Vol. 340, no. 1. — P. 311—351. — DOI: 10.1016/j.aop.2013.11.002.

8. Broby D., Basu D., Arulselvan A. The Role of Precision Timing in Stock Market Price Discovery when Trading through Distributed Ledgers // Journal of Business Thought. — 2019. — Vol. 10, no. 1. — P. 1—8. — DOI: 10.18311/jbt/2019/23355.
9. Accurate measurement of large optical frequency differences with a mode-locked laser / T. Udem [et al.] // Optics Letters. — 1999. — Vol. 24, no. 13. — P. 881. — DOI: 10.1364/OL.24.000881.
10. $^{27}\text{Al}^+$ Quantum-Logic Clock with a Systematic Uncertainty below 10^{-18} / S. M. Brewer [et al.] // Physical Review Letters. — 2019. — Vol. 123, no. 3. — P. 033201. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.033201.
11. Demonstration of 4.8×10^{-17} stability at 1 s for two independent optical clocks / E. Oelker [et al.] // Nature Photonics. — 2019. — Vol. 13, no. 10. — P. 714—719. — DOI: 10.1038/s41566-019-0493-4.
12. Bureau International des Poids et Mesures. Recommendations CCTF PSFS 2. — 2021. — URL: www.bipm.org/documents/20126/69655487/CCTF+2021+Recommendation_PSFS2+lst.pdf ; Доступ: 16.03.2023.
13. Riehle F. Towards a redefinition of the second based on optical atomic clocks // Comptes Rendus Physique. — 2015. — Vol. 16, no. 5. — P. 506—515. — DOI: 10.1016/j.crhy.2015.03.012.
14. Lodewyck J. On a definition of the SI second with a set of optical clock transitions // Metrologia. — 2019. — Vol. 56, no. 5. — P. 055009. — DOI: 10.1088/1681-7575/ab3a82.
15. Making optical atomic clocks more stable with 10^{-16} -level laser stabilization / Y. Y. Jiang [et al.] // Nature Photonics. — 2011. — Vol. 5, no. 3. — P. 158—161. — DOI: 10.1038/nphoton.2010.313.
16. 8×10^{-17} fractional laser frequency instability with a long room-temperature cavity / S. Häfner [et al.] // Optics Letters. — 2015. — Vol. 40, no. 9. — P. 2112. — DOI: 10.1364/OL.40.002112.
17. $1.5 \mu\text{m}$ lasers with sub 10 mHz linewidth / D. G. Matei [et al.] // Physical Review Letters. — 2017. — Vol. 118, no. 26. — P. 263202. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.263202.
18. Crystalline optical cavity at 4 K with thermal-noise-limited instability and ultralow drift / J. M. Robinson [et al.] // Optica. — 2019. — Vol. 6, no. 2. — P. 240. — DOI: 10.1364/OPTICA.6.000240.
19. Precision Measurement of the Hydrogen $1S - 2S$ Frequency via a 920-km Fiber Link / A. Matveev [et al.] // Physical Review Letters. — 2013. — Vol. 110, no. 23. — P. 230801. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.230801.

20. Stabilized high-power laser system for the gravitational wave detector advanced LIGO / P. Kwee [et al.] // Optics Express. — 2012. — Vol. 20, no. 10. — P. 10617. — DOI: 10.1364/OE.20.010617.
21. Compact Ion-Trap Quantum Computing Demonstrator / I. Pogorelov [et al.] // PRX Quantum. — 2021. — Vol. 2, no. 2. — P. 1. — DOI: 10.1103/PRXQuantum.2.020343.
22. Experimental Study of the Optical Qubit on the 435-nm Quadrupole Transition in the $^{171}\text{Yb}^+$ Ion / I. V. Zalivako [et al.] // JETP Letters. — 2021. — Vol. 114, no. 2. — P. 59—64. — DOI: 10.1134/S0021364021140113.
23. 1×10^{-16} frequency transfer by GPS PPP with integer ambiguity resolution / G. Petit [et al.] // Metrologia. — 2015. — Vol. 52, no. 2. — P. 301—309. — DOI: 10.1088/0026-1394/52/2/301.
24. Advanced Satellite-Based Frequency Transfer at the 10^{-16} Level / M. Fujieda [et al.] // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. — 2018. — Vol. 65, no. 6. — P. 973—978. — DOI: 10.1109/TUFFC.2018.2821159.
25. *Khabarova K. Y., Kalganova E. S., Kolachevsky N. N.* Accurate frequency and time dissemination in the optical domain // Physics-Uspekhi. — 2018. — Vol. 61, no. 2. — P. 203—211. — DOI: 10.3367/UFNe.2017.05.038131.
26. A clock network for geodesy and fundamental science / C. Lisdat [et al.] // Nature Communications. — 2016. — Vol. 7. — P. 12443. — DOI: 10.1038/ncomms12443.
27. *Riehle F.* Optical clock networks // Nature Photonics. — 2017. — Vol. 11, no. 1. — P. 25—31. — DOI: 10.1038/nphoton.2016.235.
28. An accurate and robust metrological network for coherent optical frequency dissemination / E. Cantin [et al.] // New Journal of Physics. — 2021. — Vol. 23, no. 5. — DOI: 10.1088/1367-2630/abe79e.
29. *Andrews L. C., Phillips R. L.* Laser Beam Propagation through Random Media. — Second edition. — Bellingham, WA, USA : SPIE, 2005. — DOI: 10.11117/3.626196.
30. *Kaushal H., Kaddoum G.* Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques // IEEE Communications Surveys and Tutorials. — 2017. — Vol. 19, no. 1. — P. 57—96. — DOI: 10.1109/COMST.2016.2603518.
31. Delivering the same optical frequency at two places: accurate cancellation of phase noise introduced by an optical fiber or other time-varying path / L.-S. Ma [et al.] // Optics Letters. — 1994. — Vol. 19, no. 21. — P. 1777. — DOI: 10.1364/OL.19.001777.

32. Optical frequency reference for the national time scale / D. V. Sutyrin [et al.] // Quantum Electronics. — 2019. — Vol. 49, no. 2. — P. 199—204. — DOI: 10.1070/qel16885.
33. Белотелов Г. С., Сутырин Д. В., Слюсарев С. Н. На пути к мобильному оптическому стандарту частоты на нейтральных атомах иттербия // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. — 2019. — Т. 6, № 1. — С. 24—31. — DOI: 10.30894/issn2409-0239.2019.6.1.24.31.
34. Atom interferometry with ultracold Mg atoms: frequency standard and quantum sensors / A. V. Taichenachev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1508, no. 1. — P. 012002. — DOI: 10.1088/1742-6596/1508/1/012002.
35. Combined atomic clock with blackbody-radiation-shift-induced instability below 10^{-19} under natural environment conditions / V. I. Yudin [и др.] // New Journal of Physics. — 2021. — Т. 23, № 2. — С. 023032. — DOI: 10.1088/1367-2630/abe160.
36. Optical frequency standard with a single $^{171}\text{Yb}^+$ ion / S. Chepurov [et al.] // Quantum Electronics. — 2021. — Vol. 51, no. 6. — P. 473. — DOI: 10.1070/QEL17578.
37. Inner-shell magnetic dipole transition in Tm atoms: A candidate for optical lattice clocks / D. Sukachev [et al.] // Physical Review A. — 2016. — Vol. 94, no. 2. — P. 022512. — DOI: 10.1103/PhysRevA.94.022512.
38. Inner-shell clock transition in atomic thulium with a small blackbody radiation shift / A. Golovizin [et al.] // Nature Communications. — 2019. — Vol. 10, no. 1. — P. 1—8. — DOI: 10.1038/s41467-019-09706-9.
39. Simultaneous bicolor interrogation in thulium optical clock providing very low systematic frequency shifts / A. A. Golovizin [et al.] // Nature Communications. — 2021. — Vol. 12, no. 1. — P. 5171. — DOI: 10.1038/s41467-021-25396-8.
40. Towards compact transportable optical clock based on $^{171}\text{Yb}^+$ // 2018 European Frequency and Time Forum (EFTF), Turin, Italy. — IEEE, 2018. — С. 344—347. — DOI: 10.1109/EFTF.2018.8409065.
41. Toward a New Generation of Compact Transportable Yb^+ Optical Clocks / K. Khabarova [et al.] // Symmetry. — 2022. — Vol. 14, no. 10. — P. 1—15. — DOI: 10.3390/sym14102213.
42. A new generation of cryogenic high-Q Fabry–Perot resonators for ultra-stable lasers / N. O. Zhadnov [et al.] // Quantum Electronics. — 2017. — Vol. 47, no. 5. — P. 421—425. — DOI: 10.1070/QEL16351.

43. Temperature drift contribution to frequency instability of silicon Fabry–Perot cavities / N. O. Zhadnov [et al.] // Quantum Electronics. — 2019. — Vol. 49, no. 5. — P. 424—428. — DOI: 10.1070/QEL17004.
44. Ultra-stable silicon cavities for fundamental researches and applications / G. A. Vishnyakova [et al.] // AIP Conference Proceedings. — 2020. — Vol. 2241, no. 1. — P. 020037. — DOI: 10.1063/5.0011496.
45. Compact High-Finesse ULE Cavities for Laser Frequency Stabilization / D. S. Kryuchkov [et al.] // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. — 2021. — Vol. 48, no. 10. — P. 295—300. — DOI: 10.3103/S1068335621100092.
46. Ultrastable Laser System for Spectroscopy of the $1.14 \mu\text{m}$ Inner-Shell Clock Transition in Tm and Its Absolute Frequency Measurement / A. Golovizin [et al.] // Journal of Russian Laser Research. — 2019. — Vol. 40, no. 6. — P. 540—546. — DOI: 10.1007/s10946-019-09835-y.
47. Long ULE Cavities with Relative Fractional Frequency Drift Rate below $5 \times 10^{-16}/\text{s}$ for Laser Frequency Stabilization / N. O. Zhadnov [et al.] // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. — 2020. — Vol. 47, no. 9. — P. 257—261. — DOI: 10.3103/S1068335620090079.
48. 48-cm-long room-temperature cavities in vertical and horizontal orientations for Sr optical clock / N. O. Zhadnov [et al.] // Applied Optics. — 2021. — Vol. 60, no. 29. — P. 9151. — DOI: 10.1364/AO.437473.
49. Compact ultrastable laser system for spectroscopy of ${}^2\text{S}_{1/2} \rightarrow {}^2\text{D}_{3/2}$ quadrupole transition in ${}^{171}\text{Yb}^+$ ion / I. V. Zalivako [et al.] // Quantum Electronics. — 2020. — Vol. 50, no. 9. — P. 850—854. — DOI: 10.1070/qel17373.
50. Using of optic fiber links for reference frequency transmission over a distance up to 85 km / D. M. Fedorova [et al.] // Physics Procedia. — 2015. — Vol. 72. — P. 227—231. — DOI: 10.1016/j.phpro.2015.09.067.
51. Dissemination of Reference Radio Frequencies over Fiber-Optic Lines with Electronic Compensation of Perturbations / D. M. Fedorova [et al.] // Measurement Techniques. — 2015. — Vol. 58, no. 9. — P. 994—999. — DOI: 10.1007/s11018-015-0831-y.
52. Estimation of the Precision of Transmission of the Standard Signal of a Hydrogen Oscillator Along a Fiber-Optic Communication Line with Electronic Compensation of Disturbances / R. I. Balaev [et al.] // Measurement Techniques. — 2017. — Vol. 60, no. 8. — P. 806—812. — DOI: 10.1007/s11018-017-1274-4.
53. Two-Way Transmission of Time and Frequency Signals Over Optical Fiber Communication Lines with the Help of SATRE Modems / A. V. Naumov [et al.] // Measurement Techniques. — 2019. — Vol. 61, no. 10. — P. 1009—1017. — DOI: 10.1007/s11018-019-01541-0.

54. Advances in the accuracy, stability, and reliability of the PTB primary fountain clocks / S. Weyers [et al.] // Metrologia. — 2018. — Vol. 55, no. 6. — P. 789—805. — DOI: 10.1088/1681-7575/aae008.
55. Transportable Optical Lattice Clock with 7×10^{-17} Uncertainty / S. B. Koller [et al.] // Physical Review Letters. — 2017. — Vol. 118, no. 7. — P. 073601. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.073601.