

14.09.2023

№ 746-13/8851

На _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

первый зам. генерального директора -
заместитель по научной работе
ФГУП «ВНИИФТРИ», д.т.н



[Signature]

А.Н.Щипунов
2023г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу **Кудеярова Константина Сергеевича** «Передача ультрастабильных сигналов оптической частоты с активной компенсацией фазовых шумов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика

Актуальность работы

Передача ультрастабильных сигналов времени и частоты, генерируемых атомными стандартами частоты в оптическом диапазоне спектра, представляет собой важную и актуальную задачу атомной спектроскопии, нелинейной оптики, фундаментальной физики, а также в таких прикладных областях, как, например, в обеспечении высокоточной синхронизации пространственно удаленных объектов. Поскольку точность и нестабильность современных оптических стандартов частоты (ОСЧ) достигла уровня единиц восемнадцатого знака и даже выше, то данное обстоятельство накладывает весьма жесткие требования к средствам

передачи сигналов оптической частоты. Для сличений пространственно удаленных стандартов частоты в микроволновом диапазоне в настоящее время весьма успешно применяется метод космической дуплексной связи; разумеется, при условии наличия навигационных спутников, обеспечивающих такую связь. Именно на основе данного метода производятся локальные и межконтинентальные сличение микроволновых первичных эталонов времени и частоты в передовых лабораториях мира. Однако, точность передачи эталонного времени на основе данного подхода, ограничена (не более одной наносекунды), и явно недостаточна для передачи высокоточных сигналов ОСЧ. Проблема передачи оптических частот с высокими метрологическими характеристиками на большие расстояния приобретает особую роль и в грядущем переопределение единицы времени - секунды в Международной системе единиц СИ и отражена в резолюции D 19-й Генеральной Международной конференции по мерам и весам (Париж, ноябрь 2022 г.).

Вопросы передачи сигналов оптической частоты на большие расстояния по оптоволокну и атмосферным каналам связи с сохранением точности и нестабильности на уровне 18-х знаков подробно исследованы в диссертационной работе Кудеярова Константина Сергеевича, что обуславливает её своевременность и актуальность.

Научная новизна и практическая значимость результатов диссертационной работы

Научная новизна диссертации состоит в разработке методов и средств оценки и подавления фазовых шумов, обусловленных механическими вибрациями и другими видами возмущений. Впервые разработана и исследована оригинальная конструкция интерферометра с целью снижения собственных шумов интерферометра до уровня нескольких единиц девятнадцатого знака на временах усреднения более 200 с. Впервые в России

продемонстрирована принципиальная возможность передачи излучения непрерывного лазера по турбулентному атмосферному каналу связи с высокой нестабильностью частоты и без потери когерентности фазы на протяжении течения нескольких часов.

Полученные в рамках диссертационных исследований новые физические результаты имеют весьма актуальную и практическую применимость. Перечислим наиболее значимые из них. Диссертантом предложены способы подавления фазовых шумов в разработанных автором системах передачи высокостабильных сигналов оптической частоты на большие расстояния. В диссертации обоснованы метрологические характеристики для вносимых оптоволоконными и атмосферными каналами связи шумов в процессе передачи высокостабильных сигналов частоты. В частности, вносимая нестабильность частоты для перечисленных каналов связи не превышает уровня 10^{-18} на временах усреднения более 300 с. Методы передачи эталонных сигналов по атмосферным каналам связи, разработанные автором диссертации, в ряде случаев являются единственной альтернативой широко используемым каналам оптоволоконных линий связи, что расширяет круг возможных приложений для результатов диссертационной работы (применение в системах передачи с подвижными ретрансляторами, в БПЛА, в мобильных стандартах частоты и т.д.).

Результаты диссертационной работы К. С. Кудеярова имеют перспективу внедрения в таких организациях как: ФГУП ВНИИФТРИ и его филиалы, ВНИИМ им. Д.И.Менделеева, Институт прикладной астрономии (ИПА РАН), Институт лазерной физики СО РАН, Институт физики полупроводников СО РАН и др.

Достоверность выводов и научных положений

Все выполненные расчеты, оценки и аналитические выкладки были произведены в соответствии с общепринятым математическим аппаратом квантовой механики, электродинамики и статистической физики.

Достоверность экспериментальных результатов диссертационного исследования подкреплена согласованностью с данными измерений, полученными в рамках других альтернативных подходов. Для проведения измерений использовалось поверенное измерительное оборудование.

Таким образом, достоверность результатов работы обеспечивается использованием совокупности теоретических и экспериментальных методов, в рамках которых были получены основные результаты, представленные в диссертации.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 130 страниц текста, включая 63 рисунков и 4 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 230 наименований.

Введение содержит обоснование актуальности темы, научной новизны, фундаментальной и практической значимости исследования, сформулированы цели работы, основные задачи диссертационного исследования.

Глава 1 диссертации носит обзорный характер и посвящена описанию как источников высокостабильных сигналов (в первую очередь ОСЧ), так и методов передачи эталонных сигналов микроволнового и оптического диапазонов по различным каналам связи. В этой же Главе анализируются различные экспериментальные схемы компенсации фазовых шумов, обеспечивающих сохранение исходных метрологических характеристик передаваемого сигнала.

Глава 2 посвящена различным экспериментальным аспектам передачи оптических частот по оптоволоконным линиям связи с классификацией фазовых шумов, вносимых волоконными линиями связи. Наиболее интересным результатом данной главы является описание оригинальных измерений автора, относящихся к интерферометрическим исследованиям передачи сигнала на длине волны 1140 нм по волоконным линиям связи различной длины. Показано, что применение активной компенсации фазовых

шумов позволяет снизить вклад этих шумов до уровня нескольких единиц семнадцатого знака. При этом эффективность компенсации на временах усреднения в 1000 с по нестабильности составляет не менее нескольких порядков с сравнении с ситуацией без компенсации шумов. Методы компенсации шумов, обусловленных механическими вибрациями с частотами в диапазоне 5-90 Гц, описаны в последних разделах этой Главы.

В главе 3 главе проведено обобщение подхода автора, на случай передачи высокостабильных оптических сигналов по атмосферным каналам связи.

Основными результатами этой Главы являются следующие:

1. Анализ физических процессов в атмосферных каналах связи (теория оптической турбулентности, фазовые шумы и их спектральная мощность, спектр Колмогорова и др.);
2. Анализ текущего прогресса для оптического дуплекса и передачи излучения непрерывного лазера;
3. Описание оригинальных результатов автора, полученных при передаче сигнала на длине волны 1550 нм по атмосферному каналу длиной 5 м и турбулентному каналу длиной 17 м. Автором предложена и реализована конструкция виброизолированного и термостабилизированного интерферометра, что позволило существенно снизить вклад собственных шумов в нестабильность передаваемого сигнала оптической частоты.
4. Предварительные исследования передачи сигнала с использованием подвижного отражателя.

Глава 4 посвящена детальному экспериментальному исследованию сличений трех ультрастабильных лазерных систем с длинами волн 1550 нм, 1140 нм и 871 нм, разработанных в лаборатории ФИАН, при применении стабилизированных оптоволоконных линий связи в качестве отправного пункта исследований. Относительная нестабильность, вычисленная методом «треуголки» для перечисленных лазерных источников, составила несколько

единиц четырнадцатого и пятнадцатого знаков при времени усреднения 1 с. При этом собственные шумы оптоволоконных линий связи и фемтосекундной гребенки, вносимые в нестабильность лазерных источников, не превысили уровня шестнадцатых и восемнадцатых знаков при временах усреднения 1 с и 100 с, соответственно. Данные результата имеют практическую значимость, поскольку эти оценки важны для интерпретации результатов измерений метрологических характеристик ОСЧ, создаваемых в лабораториях ФИАН.

В **заключении** суммируются основные итоги работы и приведён перечень основных результатов.

Замечания по содержанию диссертационной работы:

1. Для передачи сигналов оптической частоты на большие расстояния по оптоволоконным и атмосферным каналам связи автором разработаны методы, обеспечивающие сохранение исключительно высоких метрологических характеристик сигналов (на уровне 10^{-18}). На таком уровне точности уже сказываются релятивистские и гравитационные эффекты в частотно-временных определениях, учет которых представляет собой весьма сложную и нетривиальную задачу. Хорошо известно, что для сличений пространственно-разнесенных высокоточных ОСЧ требуется применение методов релятивистской геодезии с геоидной привязкой. К сожалению, эти важные вопросы не анализировались в диссертации.
2. В разделе 1.1 Главы 1 диссертации, на мой взгляд, излишне подробно описаны основные понятия, а также термины и определения в частотно-временной области. Часть из параграфов данного раздела (например, параграфы 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3 и т.д.) можно было бы смело опустить, сославшись на широко известную монографию Ф.Риеле («Стандарты частоты. Принципы и приложения.», Москва 2009, Перевод с английского).

3. Для практических приложений передачи эталонных сигналов времени и частоты, представляющих наибольший интерес, востребованы расстояния от нескольких сотен метров до нескольких тысяч километров. Как видоизменятся заявленные в диссертации метрологические характеристики сигналов (на уровне 10^{-18}) на таких расстояниях или они действительны лишь для лабораторных образцов ФИАН?
4. Список литературы диссертационной работы весьма обширен и содержит 230 наименований. Однако, в этом списке были бы уместными также ссылки на работы ФГУП «ВНИИФТРИ» в части передачи эталонных сигналов на большие расстояния (несколько тысяч километров) с помощью возимых часов (водородный мазер), сличений удаленных шкал времени, а также оценок вклада в частоту за счет перепада ортометрических высот на пути следования возимых часов.

Сделанные замечания носят, скорее, рекомендательный характер и не затрагивают основные положения диссертационной работы, а также общую положительную оценку диссертации.

Заключение

Оценивая диссертационную работу Кудеярова Константина Сергеевича в целом, можно сделать следующее заключение:

- результаты диссертации обладают научной новизной, практической значимостью, прошли апробацию, в достаточной степени представлены в научных трудах автора;
- результаты диссертационных исследований имеют перспективу использования в ведущих НИИ и организациях Российской Федерации;
- тема диссертации актуальна, диссертация Кудеярова Константина Сергеевича «Передача ультрастабильных сигналов оптической частоты с

активной компенсацией фазовых шумов» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор Кудеяров Константин Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Отзыв ведущей организации составлен на основе обсуждения содержания диссертационной работы на заседании Ученого совета ФГУП «ВНИИФТРИ» (секция № 7, протокол № 22 от 22.06.23 г.).

Отзыв составил:

д.ф.-м.н.,  Пальчиков Виталий Геннадьевич,
главный научный сотрудник Главного метрологического центра Государственной службы времени и частоты (ГМЦ ГСВЧ (НИО-7)) Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»),

Российская Федерация, 141570, Московская область, город Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, промзона ФГУП «ВНИИФТРИ», корпус 28

Тел. 8-495-660-57-24

e-mail: palchikov@vniiftri.ru

Заместитель начальника по научной работе

к.ф.-м.н.,  Хромов Максим Николаевич,

Главный метрологический центр Государственной службы времени и частоты (ГМЦ ГСВЧ (НИО-7)) Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»),

Российская Федерация, 141570, Московская область, город Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, промзона ФГУП «ВНИИФТРИ», корпус 28

Тел. 8-495-660-57-21

e-mail: khromov@vniiftri.ru

Секретарь Ученого совета ФГУП «ВНИИФТРИ» (секция № 7)

Семенко Анастасия Викторовна,

Главный метрологический центр Государственной службы времени и частоты (ГМЦ ГСВЧ (НПО-7)) Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»),

Российская Федерация, 141570, Московская область, город Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, промзона ФГУП «ВНИИФТРИ», корпус 28

Тел. 8-495-660-57-21

e-mail: semenko@vniiftri.ru

Список основных работ сотрудников ФГУП «ВНИИФТРИ» по тематике диссертации К.С. Кудеярова "Передача ультрастабильных сигналов оптической частоты с активной компенсацией фазовых шумов" в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Донченко С.И., Блинов И.Ю., Малимон А.Н., Балаев Р.И., Колмогоров О.В., Воронин В.А., «Обеспечение потребителей эталонными сигналами времени и частоты», Автоматика, связь, информатика, 3, 12-15 (2019).
2. A. V. Naumov, R. I. Balaev, A. N. Malimon, D. M. Fedorova, "Two-Way Transmission of Time and Frequency Signals Over Optical Fiber Communication Lines with the Help of SATRE Modems", Meas. Tech., 61, 1009–1017 (2019).
3. G. S. Belotelov, V. D. Ovsianikov, D. V. Sutyurin, A. Yu. Gribov, O. I. Berdasov, V. G. Pal'chikov, S. N. Slyusarev and I. Yu. Blinov, «Lattice light shift in strontium optical clock», Laser Phys., 30, 045501 (2020).
4. Пальчиков В.Г., Самохвалов Ю.С., Парёхин Д.А., «Сверхминиатюрный атомный стандарт частоты на основе эффекта когерентного пленения населенностей», Радиотехника, 86(12), 152–154 (2022).
5. Сутырин Д.В., Грибов А.Ю., Балаев Р.И., Горохина А.А., Пальчиков В.Г., Малимон А.Н., Слюсарев С.Н., «На пути к формированию оптической шкалы времени во ВНИИФТРИ», Квантовая электроника, 52(6), 498-504 (2022).
6. Наумов А.В., Балаев Р.И., Малимон А.Н., Кобяков Р.С., Жеглов А.В., «Высокоточное сравнение шкал времени по волоконно-оптическим линиям с использованием спутниковых модемов с дополнительной тоновой модуляцией», Измерительная техника. 2, 24-29 (2023).