

ОТЗЫВ

официального оппонента Афанасьева Антона Евгеньевича на диссертацию Кудеярова Константина Сергеевича «**Передача ультрастабильных сигналов оптической частоты с активной компенсацией фазовых шумов**», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 «Лазерная физика»

Диссертационная работа Кудеярова К.С. посвящена проблеме передачи ультрастабильных сигналов оптической частоты по различным каналам. Актуальность данной задачи обусловлена необходимостью сличения стандартов частоты, находящихся в различных лабораториях. Такое сличение требуется как на коротких дистанциях (внутри одного здания), так и на длинных, при сличении часов, расположенных в разных городах. Для передачи таких сигналов могут быть использованы оптоволоконные линии связи. Помимо этого, необходимо обеспечить передачу точного сигнала на конечные устройства. Передачу сигнала в таких случаях необходимо производить с использованием атмосферного канала, например когда в качестве конечного устройства используется летательный аппарат. В обоих случаях основной проблемой передачи ультрастабильных сигналов является потеря ими стабильности, которая обусловлена флуктуациями фазы, возникающими в используемом для передачи сигнала канале. В силу этого основным вопросом становится создание системы компенсации фазовых флуктуаций, что является центральной задачей диссертационной работы Кудеярова К.С. Развитая сеть передачи оптических сигналов совместно с системами активной компенсации фазовых шумов позволит создать сеть передачи ультрастабильных оптических сигналов между пользователями, что необходимо для проведения как фундаментальных исследований, так и прикладных задач.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объём диссертации составляет 130 страниц.

Во введении автор описывает общее положение данной работы в структуре научного знания и обосновывает её актуальность. Во введении чётко сформулированы цели и задачи исследования, которым посвящена диссертационная работа, а также положения, выносимые на защиту, приведены сведения о научных публикациях автора и апробации работы.

Первая глава диссертации посвящена литературному обзору рассматриваемой области исследований. Вводятся термины и величины, необходимые для анализа стабильности сигналов частоты. Приводится описание различных методов передачи высокостабильных сигналов и методов активной компенсации фазовых шумов. Подробно рассматриваются различные типы фазовых шумов и ограничения, которые возникают при их компенсации. Описаны области исследования, где могут быть применены ультрастабильные оптические сигналы.

Во второй главе диссертации приводится экспериментальная схема исследования передачи сигналов частоты на длине волны 1140 нм по оптоволоконным каналам. Описывается созданная система активной компенсации фазовых шумов и приводятся её характеристики. Продемонстрирована передача сигнала по каналам с длинами 5 м и 2850 м как при наличии активной компенсации фазовых шумов, так и в её отсутствие. Основным

результатом главы является подавление вносимой каналом нестабильности до уровня менее 10^{-18} за время усреднения менее 5 минут, в том числе при воздействии на канал передачи внешних механических возмущений.

Третья глава посвящена передаче ультрастабильного оптического сигнала по атмосферным линиям связи. Подробно описывается система активной стабилизации направления оптического луча, необходимая для передачи сигнала на удалённые приёмники. Рассмотрено влияние турбулентности на фазу передаваемого сигнала и приведены теоретические модели и расчёты ожидаемой стабильности. Оптимизация активной системы стабилизации направления и системы компенсации фазовых шумов позволило продемонстрировать передачу сигнала на телекоммуникационной длине волны по каналу длиной 17 м с внесением нестабильности на уровне, удовлетворяющем требованиям современных стандартов частоты.

Основное содержание четвёртой главы посвящено сличению трёх лазерных систем на различных длинах волн с использованием оптоволоконных каналов, шумы которых компенсировались по методу, изложенному в предыдущих главах. Для сличения использовался фемтосекундный генератор оптических частот. Описан метод расчета нестабильности частоты каждого из лазеров и приводятся результаты соответствующих измерений. Отмечается, что использование активно-стабилизированных оптических волокон позволяет определять нестабильность частоты лазеров на уровне 10^{-14} – 10^{-15} на требуемом уровне погрешности.

В заключении перечисляются основные результаты, полученные в диссертации.

Замечания к диссертационной работе:

- 1) Активная система компенсации фазовых шумов, представленная, на рисунке 1.10, подразумевает установку зеркала, которое отражает часть излучения назад для работы системы. Его вибрация будет восприниматься системой компенсации фазовых шумов в качестве шума. В идеальном случае, когда другие источники шума отсутствуют, система компенсации будет вносить шум в передаваемый сигнал. В диссертации не описаны использованные методы повышения механической стабильности данного зеркала.
- 2) Из текста диссертационной работы не ясно, почему передаточные функции, например (1.50) и (1.51) и последующие, имеют представленный вид. Отсутствуют ссылки на литературу с их подробным описанием.
- 3) В системе компенсации фазовых шумов при использовании оптического волокна происходит поворот поляризации отраженного от возвращающего зеркала луча. В диссертационной работе указано, что в этом случае происходит компенсация флуктуаций поляризации, что приводит к увеличению видности интерференционной картины в локальном сигнале. Приведена ссылка на работу [144]. Однако, к потребителю приходит сигнал, прошедший через возвращающее зеркало, удалённый сигнал. В нём будут присутствовать флуктуации фазы, связанные с флуктуациями поляризации. Можно ли оценить вносимую нестабильность в сигнал за счёт флуктуации поляризации?
- 4) При работе системы компенсации фазовых шумов создаётся сигнал ошибки. Система старается минимизировать данный сигнал. Однако из текста диссертационной работы не до конца ясна процедура включения стабилизации. Проводя аналогию с работой системы

стабилизации частоты, например методом Паунда-Древера-Холла: изначально на осциллографе наблюдается кривая ошибки, выбирается точка стабилизации и происходит включение петли обратной связи. Как включение петли обратной связи происходит в системе компенсации фазовых шумов?

- 5) На рисунке 2.6 и других аналогичных по тексту диссертационной работы представлены кривые усреднения частоты (жёлтым цветом). Данные кривые представлены в таком масштабе, что их сравнение затруднено.
- 6) Оценка структурной постоянной показателя преломления, выполненная по итогам измерения, производилась с учётом скорости ветра, опубликованной метеорологической службой. Данное значение может отличаться от локальных значений, на которые могут влиять многие факторы. Почему нельзя было произвести локальное измерение скорости ветра для данных оценок?
- 7) На рисунке 3.22 представлена девиация Аллана для передачи сигнала по атмосферному каналу с применением всех, разработанных в данной главе каналов стабилизации. Однако сравнение с другими аналогичными графиками данной главы затруднено, поскольку они построены в терминах модифицированной девиации Алана. Без пересчёта, который автор предлагает читателю сделать самостоятельно, трудно оценить вклад произведённых улучшений на конечную стабильность передаваемого сигнала.
- 8) На рисунке 4.8 представлен линейный дрейф частоты лазеров, работающих на длине волны 871 нм и 1550 нм относительно лазера, работающего на длине волны 1140 нм. Видно, что дрейф направлен в одну сторону, что может быть связано существенным дрейфом частоты лазера, работающего на длине волны 1140 нм. Чем, в таком случае, обусловлена стабилизация фемтосекундной гребёнки оптических частот именно по данному лазеру?

Указанные замечания не уменьшают ценности результатов, полученных в диссертации.

Научная ценность работы подтверждена публикациями в рецензируемых научных журналах и трудах конференций.

Практическая значимость заключается в создании системы активной компенсации фазовых шумов, возникающих в линии передачи оптического сигнала и в демонстрации работы такой системы на примере компенсации шумов при передаче сигналов по оптоволоконной и атмосферной линиям. Создание такой системы позволяет производить сличение разнесённых в пространстве оптических стандартов частоты, что было также продемонстрировано в диссертационной работе. Все эти шаги необходимы для создания сети передачи ультрастабильных сигналов оптической частоты для применения в фундаментальных исследованиях и прикладных задачах.

Заключение

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

– актуальность выбранной для диссертационной работы темы не вызывает сомнений. Необходимо отметить, что данные работы до недавнего времени в России не проводились. В этой связи, проделанная работа важна не только с точки зрения фундаментального знания, но

и для ряда прикладных задач. Например, для использования стандартов частоты оптического диапазона спектра при формировании национальной шкалы времени;

- все выводы и положения, сформулированные в диссертационной работе обоснованы;
- достоверность выводов и положений диссертационной работы подтверждена как теоретическими оценками, так и экспериментальными данными.

Диссертация К.С. Кудеярова является законченной научно-квалификационной работой, удовлетворяющей всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а её автор, Кудеяров Константин Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «Лазерная физика».

Официальный оппонент:

к.ф.-м.н Афанасьев Антон Евгеньевич

старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института спектроскопии Российской академии наук (ИСАН)

Российская Федерация, 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 5,
Институт спектроскопии РАН

Тел.: +7(965) 376-99-78
e-mail: afanasiev@isan.troitsk.ru



07.09.2023

/А.Е. Афанасьев/

Подпись Афанасьева Антона Евгеньевича заверяю:

Кильдиярова Римма Рифовна

Учёный секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института спектроскопии Российской академии наук (ИСАН), к.ф.-м.н.

Российская Федерация, 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 5,
Институт спектроскопии РАН
Тел.: +7 (495) 851-02-21




/Р.Р. Кильдиярова/

Список основных работ Афанасьева Антона Евгеньевича 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. А. Е. Афанасьев, А. М. Машко, А. А. Мейстерсон, В. И. Балыкин, «Спектроскопия атомов рубидия в импульсной оптической дипольной ловушке фемтосекундной длительности», Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики, 111(11), 757–762 (2020).
2. А. М. Машко, А. А. Мейстерсон, А. Е. Афанасьев, В. И. Балыкин, «Атомная дипольная импульсная ловушка со спектральной фильтрацией лазерного излучения», Квантовая электроника, 50(6), 530–536 (2020).
3. А. Е. Афанасьев, А. М. Машко, А. А. Мейстерсон, В. И. Балыкин, «Спектроскопия поглощения атомов в оптической дипольной ловушке методом их спектрально-селективного нагрева пробным полем», Квантовая электроника, 50(3), 206-212 (2020).
4. А. Е. Afanasiev, A. A. Meysterson, A. M. Mashko, P. N. Melentiev and V. I. Balykin, “Atom femto trap: experimental realization”, Appl. Phys. B, 126, 26 (2020).
5. А. Е. Афанасьев, В. И. Балыкин, «Нулевой оптический сдвиг частоты возбуждения атома, локализованного в импульсном лазерном поле», Квантовая электроника, 51(3), 248–253 (2021).
6. А. Е. Afanasiev, A. S. Kalmykov, R. V. Kirtaev, A. A. Kortel, P. I. Skakunenko, D. V. Negrov, V. I. Balykin, “Single-layer atom chip for continuous operation: Design, fabrication and performance”, Optics & Laser Technology, 148, 107698 (2022).
7. А. Е. Афанасьев, Д. В. Быкова, П. И. Скакуненко, В. И. Балыкин, «Фокусировка атомного пучка для эффективной загрузки атомного чипа», Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики, 115, 562 (2022).