

ОТЗЫВ

официального оппонента Тайченачева Алексея Владимировича на диссертацию 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»

Диссертационная работа К.С. Кудеярова посвящена исследованию и совершенствованию методов передачи оптических сигналов частоты с сохранением их метрологических характеристик, а также применению данных методов для измерения характеристик высокостабильных лазерных систем.

Тема исследования является актуальной ввиду быстрого развития области стандартов частоты, необходимых для генерации сигналов точного времени, спутниковой навигации, геодезии, фундаментальных научных исследований. В широком спектре применений стандартов частоты требуется передача их сигналов на далекие расстояния с сохранением точности и стабильности.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 130 страниц, список литературы содержит 230 наименований.

В первой главе приводится обзор литературы. Рассматриваются различные методы передачи сигналов частоты, как в микроволновом, так и в оптическом диапазоне. Обсуждается схема активной компенсации фазовых шумов, необходимой для когерентной передачи сигнала в оптическом диапазоне, а также различные факторы, которые могут ограничивать ее эффективность.

Во второй главе описываются исследования передачи оптических сигналов частоты по волоконным линиям связи. Приводятся результаты измерения относительной нестабильности и фазовых шумов, вносимых волокнами разной длины (от 5 м до 2.85 км) в передаваемый сигнал на длине волны 1140 нм. Отмечается, что без компенсации шумов даже короткие линии вносят нестабильность на уровне шестнадцатого знака, что не позволяет передавать сигналы оптических стандартов. Продемонстрировано подавление шумов при помощи активной компенсации до необходимого уровня, в том числе при воздействии искусственно возбуждаемых механических возмущений на частотах 5-90 Гц.

Третья глава диссертации связана с передачей сигналов частоты по атмосферным линиям связи. Рассматривается явление оптической турбулентности и связанные с ним фазовые и амплитудные шумы. Основным результатом данной главы является демонстрация передачи сигнала на телекоммуникационной длине волны 1550 нм по атмосферному каналу длиной 17 м с внесением относительной нестабильности частоты не более $2 \cdot 10^{-19}$ на времени усреднения 1000 с, что удовлетворяет требованиям для передачи сигнала современного оптического стандарта частоты. Использование активной системы подстройки направления пучка позволило осуществлять непрерывную передачу сигнала в течение 3 часов.

Четвертая глава посвящена применению активно-стабилизированных оптоволоконных каналов для сличения трех ультрастабильных лазеров, расположенных в разных лабораториях. Для сличения лазеров на различных длинах волн (871 нм, 1140 нм, 1550 нм) использовался фемтосекундный генератор оптических частот, вычисление нестабильности каждого из лазеров осуществлено методом «треуголки».

Результаты работы опубликованы в российских и зарубежных научных журналах, прошли апробацию на научных конференциях. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможном использовании для характеристики стандартов частоты и высокостабильных генераторов и их применении в различных приложениях.

В то же время к диссертационной работе имеются следующие замечания:

- 1) В автореферате диссертации утверждается, цитирую, «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]». Это не совсем верно. Оптическую частоту все-таки можно измерить и без использования фемтосекундных гребенок при помощи синхронизированной цепочки осцилляторов, но этот метод является более сложным технически и не является универсальным.
- 2) Результаты третьей главы связаны с передачей сигналов частоты по атмосферным линиям связи и представляют большой интерес для различных приложений. Однако, исследуемая длина канала 17 м является скорее лабораторной демонстрацией возможности такой передачи (которая к тому же уже была известна из публикаций зарубежных авторов), чем шагом к практической реализации.

Перечисленные замечания не снижают высокой научной ценности результатов, полученных в данной работе.

Заключение по диссертационной работе

Тема диссертации является актуальной. Научные положения и выводы диссертации научно обоснованы. Результаты диссертации обладают практической значимостью, научной новизной, прошли апробацию, представлены в опубликованных трудах автора. Достоверность результатов подтверждается их воспроизводимостью и согласованностью, в том числе, с результатами других авторов.

Диссертация К.С. Кудярова является законченной научно-квалификационной работой. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Диссертация удовлетворяет 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, Кудяров Константин Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «Лазерная физика».

Официальный оппонент:

д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, Алексей Владимирович Тайченачев,

главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН)

Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, д. 15Б, ФГБУН ИЛФ СО РАН

Тел.: +7-913-719-42-84

e-mail: taichenachev@mail.ru

04.09.2023

/Тайченачев А. В./

Подпись Тайченачева Алексея Владимировича заверяю:

Покасов Павел Викторович,

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН), к.ф.-м.н.



Подпись печать

/Покасов П.В./

Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, д. 15Б,
ФГБУН ИЛФ СО РАН

Тел.: 8 (383) 330-89-21

Список основных работ Тайченачева Алексея Владимировича 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. V.I. Yudin, M. Yu. Basalaev, A.V. Taichenachev, J.W. Pollock, Z.L. Newman, M. Shuker, A. Hansen, M.T. Hummon, R. Boudot, E.A. Donley, and J. Kitching, "General Methods for Suppressing the Light Shift in Atomic Clocks Using Power Modulation", *Phys. Rev. Applied*, 14, 024001 (2020).
2. M. Abdel Hafiz, R. Vicarini, N. Passilly, C.E. Calosso, V. Maurice, J.W. Pollock, A.V. Taichenachev, V.I. Yudin, J. Kitching, and R. Boudot, "Protocol for Light-Shift Compensation in a Continuous-Wave Microcell Atomic Clock", *Phys. Rev. Applied*, 14, 034015 (2020).
3. Чепуров С.В., Павлов Н.А., Луговой А.А., Багаев С.Н., Тайченачев А.В., «Оптический стандарт частоты на одиночном ионе иттербия-171», *Квантовая электроника*, 51(6), 473–478 (2021)
4. V. I. Yudin, A. V. Taichenachev, M. Yu. Basalaev, O. N. Prudnikov, H. A. Fürst, T. E. Mehlstäubler and S. N. Bagayev, "Combined atomic clock with blackbody-radiation-shift-induced instability below 10^{-19} under natural environment conditions", *New J. Phys.*, 23, 023032 (2021).
5. T. Zanon-Willette, D. Wilkowski, R. Lefevre, A. V. Taichenachev, and V. I. Yudin, "SU(2) hyper-clocks: Quantum engineering of spinor interferences for time and frequency metrology", *Phys. Rev. Research*, 4, 023117 (2022).
6. V.I. Yudin, A.V. Taichenachev, O.N. Prudnikov, M.Yu. Basalaev, V.G. Pal'chikov, M. von Boehn, T.E. Mehlstäubler, and S.N. Bagayev, "Probe-Field-Ellipticity-Induced Shift in an Atomic Clock", *Phys. Rev. Applied*, 19, 014022 (2023).
7. A.P. Kulosa, O.N. Prudnikov, D. Vadlejch, H.A. Fürst, A.A. Kirpichnikova, A.V. Taichenachev, V.I. Yudin and T.E. Mehlstäubler, "Systematic study of tunable laser cooling for trapped-ion experiments", *New J. Phys.*, 25, 053008 (2023).