

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Александрова Дмитрия Валерьевича

**«Лазерная интерферометрия на основе частотно-фазовой модуляции для исследования сейсмических и геоакустических колебаний»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 «Радиофизика»**

Актуальность темы исследования

Применение методов лазерной интерферометрии обеспечивает возможность построения сверхвысокочувствительных измерительных систем, предназначенных для мониторинга окружающей среды. Особый интерес представляет изучение акустических и сейсмических процессов, протекающих в земной коре, требующее применения измерительной аппаратуры с предельными значениями точности и пороговой чувствительности. На сегодняшний день указанным требованиям наиболее удовлетворяют лазерные интерферометры-деформографы, способные регистрировать смещения ниже фонового уровня. Однако создание измерительных комплексов на основе лазерных интерферометров-деформографов представляет собой достаточно сложную проблему, так как регистрация акустических и сейсмических сигналов должна осуществляться в широком спектральном, динамическом и временном диапазонах. Это требует решения широкого круга задач по организации обратной связи, обеспечению стабильности работы элементов измерительной системы, а также разработки надежных методов цифровой обработки выходных интерферометрических сигналов. В этой связи тема диссертационной работы Д.В. Александрова, посвященная разработке метода частотно-модулированной лазерной интерферометрии высокой точности представляется весьма актуальной.

Научная новизна и практическая значимость исследований

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Предложен и впервые применен метод лазерной интерферометрии с новым принципом частотной модуляции, методиками определения параметров обратной связи, линеаризации и цифровой обработки сигналов для исследований акустических и сейсмических колебаний.

2. Предложена новая модель трехзеркального лазерного резонатора, на основании которой обнаружены режимы нестабильной работы и предложены способы стабилизации с помощью установления необходимых параметров обратной связи.

3. Впервые применен метод лазерной интерферометрии для исследования сейсмических колебаний в синхронных измерениях, проводимых в разных зонах. Впервые выполнены синхронные параллельные и независимые исследования с помощью длиннобазовых интерферометров, и проведен сравнительный анализ.

Практическая значимость проведенных исследований состоит в том, что применение разработанного метода лазерной интерферометрии высокой точности на основе частотной модуляции в сочетании с предложенными методиками определения параметров обратной связи и цифровой обработки интерферометрических данных позволяет повысить стабильность работы и точность трехзеркального интерферометра-деформографа, в котором используется обратное отражение для регистрации перемещений, а также осуществлять измерение амплитудно-временных характеристик акустических и сейсмических колебаний в широком динамическом диапазоне до 200 дБ с точностью регистрации деформаций 10^{-12} .

Объем и структура диссертации

Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение и список литературы.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, определены цели и задачи диссертационной работы, определены научная новизна и значимость, сформулированы защищаемые положения.

В **первой главе** приведен обзор литературы.

Во **второй главе** описывается принцип работы трехзеркального резонатора с обратной связью, предлагается метод расчета параметров резонатора, основанный на решении интегральных уравнений. В качестве расчетной модели предлагается резонатор с цилиндрическими зеркалами. Получены и проанализированы интегральные уравнения, описывающие электромагнитное поле в трехзеркальном резонаторе с цилиндрическими зеркалами. Определены условия оптимальной настройки He-Ne лазера, обеспечивающие стабильную работу трехзеркального лазерного интерферометра. Для исследованных лазерных резонаторов получены оценки температурных коэффициентов расширения и постоянные времени, характеризующие тепловую инерционность лазерных резонаторов.

3 глава посвящается разработке методов регистрации сигналов трехзеркального лазерного интерферометра-деформографа. Предложен новый метод фазо-частотной модуляции, основанный на суперпозиции двух независимых модуляционных процессов. Предложена методика линеаризации выходного сигнала при цифровой обработке для компенсации помех, вносимых системой регистрации, и увеличения динамического диапазона.

В **главе 4** приводятся и анализируются результаты исследований акустических и акусто-сейсмических процессов на экспериментальных установках с применением предложенных и разработанных методов. Представлены результаты наблюдений процессов естественного и искусственного происхождения в виде зарегистрированных сейсмических и геоакустических деформационных сигналов. Выделены и проанализированы вступления объемных и поверхностных сейсмических волн.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы, к наиболее значимым из которых относятся следующие:

- Предложен новый метод интерферометрических измерений деформаций с методиками линейризации и цифровой обработки для достижения высокой точности в широком динамическом до 200 дБ диапазоне с точностью регистрации деформаций $\Delta L/L = 10^{-12}$.
- Предложена двумерная модель трехзеркального лазерного резонатора, для которого в квазиоптическом приближении сформулирована система интегральных уравнений. На основе анализа решений, численных расчетов и экспериментального моделирования обнаружены режимы неустойчивой работы и предложены способы стабилизации с помощью установления необходимых параметров обратной связи. Определены условия оптимальной настройки зеркал. Определены параметры обратной связи, необходимые для устойчивой работы в широком временном диапазоне.
- Проведены исследования и комплексные испытания экспериментальных макетов трехзеркального лазерного интерферометра-деформографа. Показана возможность применения разработанных методов для выделения глобальных геофизических явлений. Показана возможность сейсмодеформационного и акустического мониторинга геодинамических процессов на основании подтверждения результатов сравнительных измерений разными методами и разными высокочувствительными пространственно-разнесенными приборами в сейсмо-энергоактивных зонах.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в диссертационной работе

Представленные в диссертационной работе научные положения, выводы и рекомендации являются обоснованными, достоверными и надежными поскольку получены с использованием апробированных методов интерферометрии и компьютерного моделирования, с применением современного оборудования, основаны на разностороннем анализе

результатов, сопоставлении теоретических и экспериментальных данных, сравнении результатов экспериментальных исследований с существующими работами других авторов.

Замечания

1. В главе 1 обзор литературы содержит избыточную информацию, так как необходимость приведенного в ней описания общих принципов интерферометрии, а также принципов действия лазеров представляется сомнительной. Пункты 1.1 - 1.3 практически не содержат полезной для данной диссертации информации. Также следует отметить отсутствие в разделе 1.4. описаний зарубежных деформографов, что делает обзор литературы недостаточно полным.

2. В описываемой в разделе 3.1 системе регистрации гетеродинного типа цифровой сигнал с использованием ЦАП преобразуется в аналоговый, а затем снова преобразуется в цифровой. При этом смысл двойного преобразования не раскрывается.

3. На рисунках 16,17 и 18 не указана цена деления по оси времени. Нет ее и на вертикальной оси. В главе 4 на рисунках шкала времени уже не вызывает нареканий, но проблема с вертикальной осью сохраняется. Если для главы 3 это не принципиально, то в главе 4 данная проблема воспринимается негативно, так как там речь идет о реальных экспериментах по регистрации колебаний. И только подпись на скачке на рис.29 случайно указывает нам на масштаб вертикальной оси, который, однако, тут же изменяется уже на нижнем графике того же рисунка.

4. Изменение масштаба на рисунке 18 б затрудняет его сопоставление с рисунком 18 а. В подрисуночной подписи указана длительность записи – 1 час, однако на спектрально-временной диаграмме запись длится 150 с, что явно отличается от часовой длительности.

5. В формуле 59 присутствуют обозначения, которые, по-видимому, взяты из программы какого-то математического пакета, который не знает о существовании греческого алфавита. В результате обозначения получились громоздкими, что затрудняет восприятие формулы. Это же замечание относится к формуле на стр. 70.

6. В разделе 3.3 описан алгоритм работы программы сшивки данных, но не указана погрешность, с которой осуществляется сшивка. Это снижает ценность изложенного в данном разделе материала, так как нет возможности оценить эффективность работы описанной программы.

7. Раздел 3.5 изложен не вполне ясно. Нет четкой структуры подачи материала. По-видимому, новая программа применена к старым данным. Если это так, то не ясно, как обрабатывали ранее, и каков выигрыш от применения новых методов обработки. Утверждение «По сравнению с другими методами обработки интерферометрических данных мы можем использовать предложенную программу для увеличения линейности на один порядок» ничем не подтверждается.

8. Следует отметить низкое качество некоторых рисунков и формул. Так, например, формула (2) практически не читаема, а качество рисунков 2,4, 5 и 7 оставляет желать лучшего. Отсутствие подписей под многими рисунками затрудняет быстрый поиск необходимой информации.

Сделанные замечания не затрагивают основных результатов, полученных в диссертационной работе, и не снижают их научной значимости и практической ценности. Основные результаты диссертации опубликованы в 13-ти статьях из перечня ВАК. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа «Лазерная интерферометрия на основе частотно-фазовой модуляции для исследования сейсмических и геоакустических колебаний» является законченной научно-исследовательской работой, полностью удовлетворяющей всем требованиям ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-

математических наук, изложенным в Положении о присуждении ученых степеней от 24.09.2013 № 842, а ее автор, Александров Дмитрий Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 Радиофизика.

Официальный оппонент,

ведущий научный сотрудник Лаборатории прецизионных оптических методов измерений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (690041, г. Владивосток, ул. Радио, д.5.), доктор физико-математических наук по специальности 05.11.16 – информационно-измерительные и управляющие системы
тел.:+7(902)4892958, e-mail: okamenev@iacp.dvo.ru.

Каменев Олег Тимурович

«11» мая 2021 г.

