

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук
(Фрязинский филиал)

На правах рукописи



Александров Дмитрий Валерьевич

**ЛАЗЕРНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНО-
ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ
И ГЕОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ.**

01.04.03 – Радиофизика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

научный руководитель:

к.ф.-м.н.

М.Н. Дубров

Фрязино - 2020

Введение	4
Глава 1 Обзор литературы	8
1.1. Физические основы интерферометрии.....	8
1.2. Лазерная интерферометрия	16
1.3. Оптическая интерферометрия волоконных структур.....	26
1.4. Высокочувствительная интерферометрия для изучения акустических и сейсмических процессов.....	30
Глава 2 Исследование влияния оптической обратной связи на параметры трехзеркального интерферометра-деформографа	37
2.1. Духзеркальный резонатор.....	38
2.2. Трехзеркальный резонатор.	42
2.3 Численное моделирование лазерного резонатора с несогласованной нагрузкой.....	50
2.4. Исследование трехзеркального лазерного интерферометра с термоуправляемым резонатором.....	53
Глава 3. Разработка методов регистрации и автоматизированного анализа данных лазерного интерферометра-деформографа.....	62
3.1 Система регистрации гетеродинного типа.....	62
3.2 Разработка и апробация методов линеаризации данных лазерного интерферометра-деформографа.	64
3.3 Описание работы программы сшивки данных	68
3.4 Программа спектрально-временного анализа данных лазерного деформографа.	72
3.5 Разработка методов исследования свойств наноматериалов с использованием лазерных интерферометров и компьютерной обработки данных	73
Глава 4 Применение интерферометра-деформографа для исследования сейсмических и геоакустических процессов.....	77
4.1 Предварительные исследования в лабораторных условиях.....	77
4.2 Результаты испытаний модернизированного лазерного интерферометра-деформографа на геополígонах (Фрязино, Камчатка, Владивосток).....	80
4.2.1 Используемое оборудование и условия экспериментов.....	80
4.2.2 Сейсмо-деформационный и акустический мониторинг геодинамических процессов высокочувствительными пространственно разнесенными приборами в сейсмоэнергoактивной и асейсмической зонах (Камчатка, Фрязино, Владивосток.) ..	85

Заключение.....	101
Список цитируемой литературы:	105
Список основных публикаций автора по теме диссертации	114

Введение

Методы интерферометрии используются во многих областях физики, медицины, телекоммуникаций, биологии и химии. Они позволяют исследовать свойства материалов и процессов, изучение которых ранее было затруднительно или не возможно традиционными физико-химическими методами.

Применение лазерных источников света, обладающих высокой когерентностью, большой мощностью в узком спектральном диапазоне, высокой направленностью, позволило разработать и реализовать новые методы интерферометрии применительно к разным объектам и разным процессам. Наряду с традиционными измерениями линейных перемещений, включая сверхмалые перемещения, измерения расстояний, скоростей и вибраций, размеров, формы поверхностей и т.д., новые методы и новые высокотехнологичные материалы дали возможность развить методы лазерной интерферометрии для измерений с высокой точностью оптических свойств разных веществ, включая полупроводники, тонкие пленки, биоткани, случайно-неоднородные среды, диффузно рассеивающие объекты, медленно меняющиеся во времени и незначительные по величине расстояния и т.д. Получили развитие разные направления, связанные с исследованием и диагностикой плазмы, исследованиями в медицине и биологии, интерференционные датчики физических величин. Появилась возможность исследовать разные процессы: акустические, сейсмические, диффузионные и др.

Развитием классических интерференционных методов является лазерная интерферометрия с оптической обратной связью. При этом используется частотная модуляция излучения на основе электрооптического, акустооптического и пьезо-эффектов. Частотную модуляцию интерференционного сигнала обеспечивают также путем суперпозиции двух волн разной оптической частоты. Один из методов частотной модуляции, основанный на известном свойстве полупроводниковых лазеров изменять

частоту излучения под воздействием изменений инжекционного тока [1], позволил определить расстояние до объекта при использовании синусоидальной частотной модуляции [2] и провести одновременные измерения дальности и скорости диффузно-рассеивающих объектов с применением линейной частотной модуляции [3].

Важным направлением является лазерная интерферометрия на основе высокочувствительных интерферометров-деформографов для изучения акустических и сейсмических процессов, происходящих в окружающей среде. Актуальность таких исследований возрастает со временем, поскольку важно иметь информацию и средства диагностики изменяющегося окружающего нас мира. Эти исследования ставят задачи разработки новых интерференционных методов, позволяющих достичь предельных точностей измерений. Реализация методов включает определение параметров обратной связи, установку режимов стабилизации лазера и интерферометра, а также разработку методик цифровой обработки интерферометрических данных.

Для решения этих задач предлагается использовать интерферометр на основе трехзеркального лазерного резонатора с новым методом фазочастотной модуляции (ФЧМ), основанным на суперпозиции двух независимых модуляционных процессов. Один из них осуществляется с помощью электрооптического модулятора, частота модуляции задается пилообразным опорным напряжением (30 кГц) от внешнего источника, это позволяет регистрировать интерференционный сигнал и в отсутствие деформационных колебаний. Второй модуляционный процесс обусловлен изменениями длины измерительного плеча интерферометра в соответствии с деформационными колебаниями. При этом параметрами излучения управляют при медленной непрерывной автоподстройке длины резонатора лазера в соответствии с изменениями параметров измерительного плеча интерферометра.

Параметры обратной связи предлагается определять с помощью экспериментального и математического моделирования поведения

электромагнитного поля в трехзеркальном лазерном резонаторе и характеристик, полученных из решения интегральных уравнений и численных расчетов. При разработке методик цифровой обработки применяются методы Фурье-преобразования и развиваются методы линеаризации, что позволяет компенсировать помехи, вносимые системой регистрации и увеличить динамический диапазон используемых инструментов.

Практическая значимость полученных результатов исследований, реализующих предлагаемые методы на базе лабораторных оптических установок и в условиях подземного полигона ФИРЭ РАН при изучении реальных природных явлений, свидетельствует о важности и актуальности поставленных в работе задач.

Целью данной работы является: разработка метода частотно-модулированной лазерной интерферометрии высокой точности, основанного на частотной модуляции излучения внешними относительно лазера отражателями и рассеивающими объектами, позволяющего исследовать спектрально-временные характеристики акустических и сейсмических колебаний в широком динамическом и временном диапазонах; реализация метода и подтверждение экспериментами.

Экспериментальное исследование включает

- а) создание автоматизированных интерферометрических установок, в том числе на базе подземного Лучеводного полигона ФИРЭ РАН;
- б) разработку методик цифровой обработки интерферометрических данных с применением линеаризации и Фурье-преобразования;
- в) определение режимов неустойчивости интерферометра на основе трехзеркального лазерного резонатора и параметров обратной связи для достижения стабильной работы;
- г) проведение и анализ результатов синхронных измерений сейсмических колебаний, полученных в разных сейсмических зонах.

Защищаемые положения:

1. Необходимая высокая инструментальная чувствительность лазерного интерферометра-деформографа для регистрации и исследования акустических и сейсмических колебаний достигается применением трехзеркального лазерного резонатора, а также путем контроля и обеспечения требуемой степени развязки лазера и несогласованной нагрузки с помощью метода лазерной интерферометрии, основанного на частотной модуляции излучения внешними относительно лазера отражателями и рассеивающими объектами.

2. Стабилизация устойчивой работы интерферометра-деформографа на основе трехзеркального лазерного резонатора зависит от параметров обратной связи. Интегральные уравнения применительно к трехзеркальному лазерному резонатору описывают поведение электромагнитного поля и наряду с экспериментальным моделированием и численным расчетом позволяют обнаружить режимы неустойчивой работы и определить параметры обратной связи, необходимые для устойчивой работы в широком временном диапазоне.

3. Созданные деформографы на базе подземного Лучеводного полигона ФИРЭ, предложенные методы частотной модуляции в лазерной интерферометрии и разработанные методы линеаризации и цифровой обработки интерферометрических данных позволяют регистрировать изменение спектрально-временной диаграммы оптического отклика при акустических и сейсмических колебаниях в широком динамическом до 200 дБ диапазоне с чувствительностью регистрации деформаций $\Delta L/L = 10^{-12}$.

Глава 1 Обзор литературы

1.1. Физические основы интерферометрии

Методы интерферометрии, основанные на интерференции электромагнитных волн, широко используются во многих областях физики, медицины, телекоммуникаций, биологии и химии.

Особенности интерференционных явлений и применения интерференции подробно описаны в [4]. Интерференция это явление, при котором в результате сложения в пространстве двух (или нескольких) волн получается ослабление или усиление амплитуды результирующей волны.

Интерференция свойственна для волн независимо от их природы: для электромагнитных (например, световых или радиоволн) волн, упругих волн, а также волн на поверхности жидкости. При распространении в пространстве двух волн, в произвольной точке этого пространства результирующее колебание является геометрической суммой колебаний. Этот принцип суперпозиции нарушается только при распространении волн в нелинейной среде. Для условий интерференции необходимо, чтобы волны были когерентны. Когерентными являются волны одинаковой длины, между которыми не меняется разность фаз [5]. Гармонические (синусоидальные) колебания одной частоты всегда будут когерентны.

Гармоническое колебание описывается выражением:

$$x = A \cos(2\pi\nu t + \varphi), \quad (1)$$

где x — колеблющаяся величина (например, напряжённость электрического и магнитного полей, смещение маятника от положения равновесия, и т.д.). Частота гармонического колебания ν , его амплитуда A и фаза φ постоянны во времени. При сложении двух гармонических колебаний с разными амплитудами A_1 и A_2 и фазами φ_1 и φ_2 , но одинаковой частотой ν , образуется гармоническое колебание той же частоты. Амплитуда результирующего колебания:

$$A_p = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (2)$$

может изменяться в пределах от $|A_1 + A_2|$ до $|A_1 - A_2|$ в зависимости от разности фаз $\varphi_1 - \varphi_2$ (2). Интенсивность результирующего колебания, пропорциональная A_p^2 , также зависит от разности фаз.

Если фазы колебаний φ_1 и φ_2 изменяются, но их разность ($\varphi_1 - \varphi_2$) остается постоянной и рассматривается случай идеально гармонических колебаний, то интенсивность суммарного колебания определяется разностью фаз складываемых колебаний. При медленном изменении разности фаз двух колебаний, пока их разность фаз не изменится на величину, сравнимую с π , колебания остаются когерентными.

Видимый солнечный свет, с частотой в диапазоне от $4 \cdot 10^{14}$ до $8 \cdot 10^{14}$ Гц, можно рассматривать как гармоническую волну с быстро меняющимися фазой, частотой и амплитудой. При этом длина когерентности приблизительно равна 10^{-4} см. Свет, излучаемый разреженным газом в виде узких спектральных линий более близок к монохроматическому. Разность фаз двух пучков такого света практически не меняется на расстоянии 10 см.

Таким образом, излучение теплового источника не является монохроматическим, оно заполняет широкий диапазон длин волн. Спектр солнечного излучения захватывает ультрафиолетовые, видимые и инфракрасные волны. Для повышения монохроматичности излучения используются монохроматоры, которые могут выделять относительно узкий диапазон из непрерывного спектра или использовать газоразрядные источники света низкого давления, которые дают отдельные атомные или молекулярные достаточно узкие спектральные линии. Однако интенсивность излучения в спектральных линиях не может превышать интенсивность излучения абсолютно черного тела, температура которого соответствует температуре возбуждения атомов и молекул. В обоих случаях монохроматизация излучения достигается путем больших потерь энергии.

Световая волна, излучаемая лазером, создается координированным стимулированным излучением света во всем объеме активного вещества. Следовательно, пространственная когерентность света на выходной апертуре лазера сохраняется по всему сечению пучка. Лазерное излучение обладает огромной пространственной когерентностью, т. е. высокой направленностью по сравнению с излучением нагретого тела. С помощью лазера можно получить свет, объем когерентности которого в 10^{17} раз больше, чем объем когерентности световой волны одинаковой интенсивности, получаемой от монохроматических не лазерных источников света. Длина когерентности лазерного излучения может превышать километры.

В радиодиапазоне источники могут генерировать направленное и монохроматическое излучение высокой мощности. Антенные излучатели, подключенные к одному источнику электрических колебаний, могут быть когерентно возбуждены. В области радиоволн более монохроматические источники колебаний, а длина волны во много раз превышает длину волны видимого диапазона. Длина радиоволнового цуга может быть существенно больше размеров Солнечной системы.

Основные особенности явления интерференции, описанные выше, в равной степени применимы к упругим и электромагнитным волнам. В случае звуковых и радиоволн их согласованность может быть легко обеспечена, например, путем подачи на разные громкоговорители или антенны одинакового тока. Когерентные световые лучи, генерируемые долазерными источниками, могут быть получены из того же источника света с использованием специальных методов. Например, Т. Юнг впервые заметил (1802 г) интерференцию света, разделив волну на две части с двойной щелью. Свет от монохроматического точечного источника S попадал в два небольших отверстия на экране. Эти отверстия моделируют два когерентных источника света S_1 и S_2 . Волны из них пересекаются в области перекрытия и проходят разными путями: ℓ_1 и ℓ_2 . На экране чередуются светлые и темные полосы.

Поскольку существует четкая зависимость между длиной волны, разностью хода интерферирующих лучей и расположением максимумов и минимумов, зная различие в расположении максимумов и минимумов можно определить длину волны, и наоборот, зная длину волны, по расположению максимумов и минимумов определять разность хода лучей, т. е. измерять расстояния. Для того чтобы наблюдать интерференционную картину с достаточной видимостью, необходимо обеспечить в интерференционной схеме условия, при которых максимальная разность хода пучков много меньше длины когерентности.

Интерференция волн является важным приложением как в научных исследованиях, так и в технологиях. Устройства, которые используют интерференцию, включают в себя: оптические интерферометры, радиоинтерферометры и устройства измерения расстояний.

Существуют интерферометры для звуковых и электромагнитных волн: оптические (ультрафиолетовая, видимая и инфракрасная области спектра) и радиоволны различной длины. Принцип действия всех интерферометров один и тот же, и они отличаются только методами получения когерентных волн и непосредственно измеряемой величиной. С помощью устройства луч света пространственно разделяется на два или более когерентных луча, которые проходят через разные оптические пути и затем сходятся. В точке схождения лучей наблюдается интерференционная картина, форма которой, т.е. форма и взаимное расположение максимумов и минимумов, зависит от типа деления светового пучка на когерентные лучи, от числа интерферирующих пучков, разности их оптических путей, относительной интенсивности, размеров источника, спектрального состава света. Способы получения когерентных пучков в интерферометрах очень разнообразны, поэтому существует множество различных версий интерферометров.

Радиоинтерферометр состоит из двух или нескольких антенн, разнесенных на большое расстояние и связанных между собой линией связи [6]. Радиоинтерферометры используются для измерения скорости

распространения волн; расстояний между двумя излучателями волн или между излучателем и отражающим телом, т. е. применяются как дальнометры; для измерения распределения интенсивности радиоизлучения протяженных источников; при решении задач геодезии, астрономии и геодинамики; обсуждаются перспективы использования космических радиоинтерферометров ("радиотелескопов больше Земли") для астрофизики и космологии [7 - 11].

Наибольшее распространение получили оптические интерферометры. Они используются для измерения длин волн спектральных линий, показателей преломления прозрачных сред, абсолютных и относительных длин, угловых размеров звезд, качества оптических компонентов и их поверхностей, а также чистоты обработки поверхности металлов и т. д. В объективах фотоаппаратов и кинопроекторов, перископах подводных лодок используется интерференция для просветления и уменьшения отражаемой энергии.

Поэтому необходимым условием для получения устойчивой интерференционной картины является наличие по меньшей мере двух когерентных волн, наложенных друг на друга, причем метод получения, заключается в разделении каждой падающей волны на две. Разные интерферометры используют разные приемы, необходимые для получения интерференционной картины. Широко известны интерферометры Фабри-Перо, Майкельсона, Рождественского, Маха-Цандера и др.

Основная схема двухлучевого интерферометра Майкельсона, сыгравшего громадную роль в истории науки, изображена на рис. 1. Пучок от источника L падает на пластинку P_1 , покрытую тонким слоем серебра или алюминия. Луч AB , прошедший через пластинку P_1 , отражается от зеркала M_1 и, попадая опять на пластинку P_1 , частично проходит через нее, а частично отражается по направлению AO . Луч AC отражается от зеркала M_2 и, попадая на пластинку P_1 , частично проходит также по направлению AO . Так как обе волны 1 и 2, распространяющиеся по направлению AO , представляют собой

расчлененную волну, исходящую из источника L , то они когерентны между собой и могут интерферировать друг с другом. Так как луч 2 пересекает пластинку P_1 три раза, а луч 1 – один раз, то на его пути поставлена пластинка P_2 , идентичная P_1 , чтобы компенсировать добавочную разность хода, существенную при работе с белым светом.

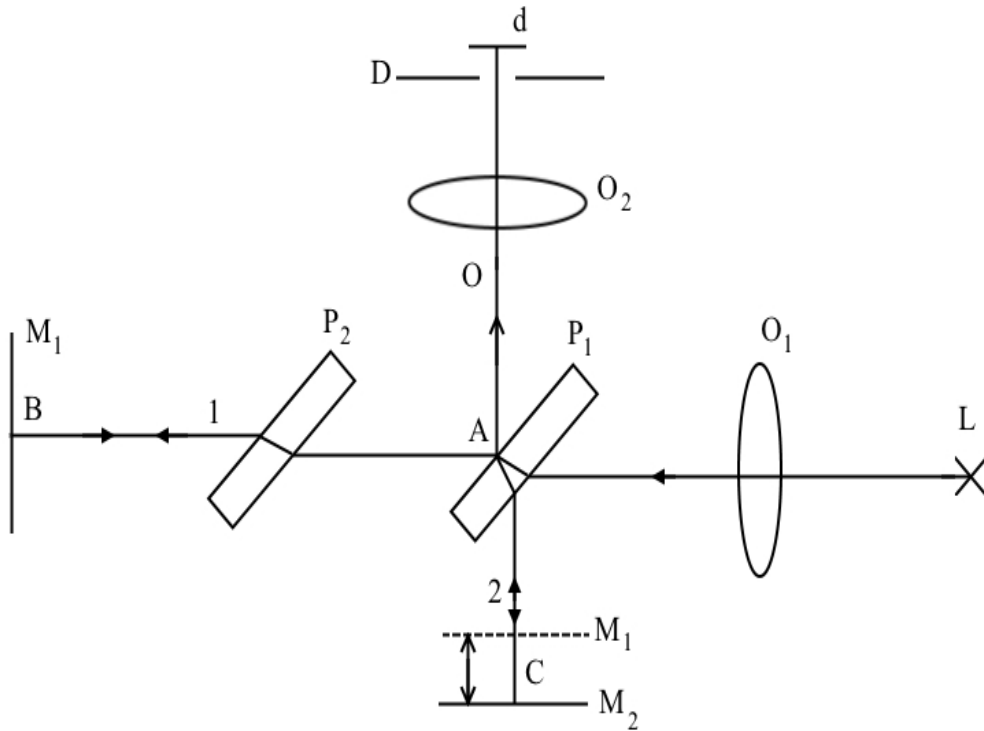


Рис. 1 Интерферометр Майкельсона

Интерферометр Майкельсона часто используется для физических измерений и технических устройств. Впервые было измерено абсолютное значение длины волны света и была продемонстрирована независимость скорости света от движения Земли. Перемещая одно из зеркал, можно плавно изменять разность оптического пути, и зависимость интенсивности центральной точки, в свою очередь, используется для анализа спектрального состава падающего излучения с разрешением $1/\delta \text{ см}^{-1}$ (δ оптическая разность хода). На основе этого принципа работают фурье-спектрометры, которые используются в длинноволновом инфракрасном диапазоне спектра (50-1000 мкм) для решения задач физики твердого тела, органической химии и химии полимеров, а также диагностики плазмы. Впервые с помощью фурье-

спектрометра было получено разрешение $\sim 0,005 \text{ см}^{-1}$ в диапазоне длин волн 0,8—3,5 мкм.

Среди двухлучевых интерферометров, предназначенных для измерения показателей преломления газов и жидкостей, используются интерференционные рефрактометры, интерференционные газоанализаторы. Один из них — интерферометр Жамена, который можно использовать для определения очень малого изменения показателя преломления, например при изменении температуры газа или прибавлении посторонних примесей. Поэтому его нередко называют интерференционным рефрактометром. Хотя определение абсолютного значения самого показателя преломления довольно затруднительно.

Одним из вариантов интерферометра Жамена является интерферометр Маха-Цендера и Рождественского, в котором используются две полупрозрачные пластины и два зеркала. В этих интерферометрах расстояние между лучами может быть очень большим, что облегчает установку различных исследуемых объектов в одном из них, так что они широко используются в аэрогазодинамических исследованиях.

Многолучевой интерферометр Фабри — Перо состоит из двух прозрачных пластин, поверхности которых в принципе совершенно плоски и параллельны друг другу. Одна из поверхностей каждой пластины покрывается отражающим слоем с коэффициентом отражения R , коэффициентом пропускания T и коэффициентом поглощения $A = 1 - R - T$. Благодаря многократному прохождению и отражению падающий луч света делится на бесконечное число параллельных друг другу лучей. Вышедшие из эталона лучи снова соединяются в бесконечности и интерферируют. Таким образом, в фокусе линзы можно видеть интерференционные кольца. Между двумя соседними лучами имеется оптическая разность хода δ . Если отношение δ/λ — целое число, то прошедшие лучи интерферируют, давая максимум, и падающая энергия в этом случае полностью проходит. Если это условие в точности не выполняется, то лучи в результате интерференции

гасят друг друга; это приводит к тому, что падающая энергия отражается назад к источнику света. Положение максимумов и минимумов зависит от длины волны. Поэтому интерферометр Фабри-Перо разлагает сложное излучение на спектр. Интерферометр Фабри-Перо используется в качестве интерференционного спектрального прибора высокого разрешения. Специальные сканирующие интерферометры Фабри-Перо с фотоэлектрической регистрацией используются для исследования спектров в видимом, инфракрасном и сантиметровом диапазоне длин волн.

Интерферометр Фабри — Перо, как и другие интерферометры, нашел широкое применение в разных диапазонах и для разных целей.

Для исследования спектра лазерного излучения, можно использовать обычный интерферометр Фабри-Перо. В квазиоптическом варианте с линзами и фокусирующими зеркалами он используется в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне для диагностики плазмы. Плоские резонаторы Фабри-Перо, между зеркалами которых помещается излучающая среда, предложили использовать в качестве резонансных элементов лазеров независимо друг от друга Шавлов, Таунс и Прохоров [12].

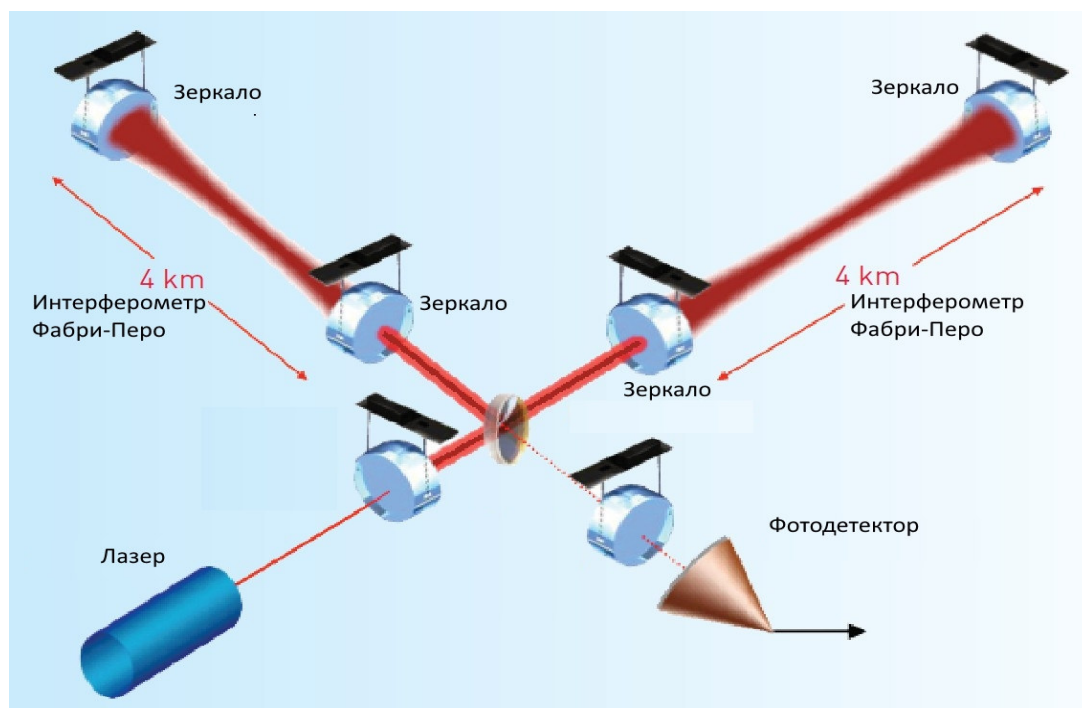


Рис. 2. Расширенная конструкция интерферометра LIGO

В 1982 году Р. Древер предложил повысить чувствительность гравитационно-волнового детектора, вставив интерферометр Фабри-Перо в каждое из плеч интерферометра Майкельсона. Интерферометры Фабри-Перо, помещенные в каждое плечо интерферометра Майкельсона, - это базовая конструкция для начального LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, США) рис. 2 и других детекторов гравитационных волн в Италии и Японии. [13]

1.2. Лазерная интерферометрия

Применение лазерных источников света [14 -16], обладающих высокой когерентностью, большой мощностью в узком спектральном диапазоне, высокой направленностью, позволило разработать и реализовывать новые методы интерферометрии применительно к разным объектам и разным процессам. Произошла подлинная революция в оптике и оптических методах исследований, многообразие которых обусловлено учетом конкретных физических ситуаций. Наряду с традиционными измерениями линейных перемещений, включая сверхмалые перемещения, измерениями расстояний, скоростей и вибраций, размеров, формы поверхностей, контроля показателя преломления [17,18] методы интерферометрии были применены для исследования параметров квазиоптических и волоконно-оптических трактов передачи в связи с возможностью использования этих трактов для увеличения информационной емкости каналов передачи, их помехозащищенностью и скрытностью, а также в качестве фазостабильных трактов для фазирования элементов синтезированных антенн [19 -21]. С развитием активной интерферометрии или интерферометрии с обратной связью [22 - 26] и новых высокотехнологичных материалов появилась возможность развить методы лазерной интерферометрии для измерений с высокой точностью на уровне $1 \cdot 10^{-8}$ - $1 \cdot 10^{-9}$ относительных единиц, при измерении оптических свойств разных веществ, включая полупроводники; тонкие пленки; биологические объекты [27]; случайно-неоднородные среды; диффузно рассеивающие объекты [3]; медленно меняющиеся во времени и

незначительные по величине расстояния и т.д.. Получили развитие разные направления, связанные с исследованием и диагностикой плазмы [28], исследованиями в медицине и биологии [27], интерференционные датчики физических величин (температуры, микроперемещений, давления), изменение которых можно преобразовать в изменение геометрической или оптической разности хода интерферирующих лучей и т.д.[29]. Появилась возможность исследовать разные процессы: акустические, сейсмические, диффузионные [3] и т.д. Нестандартное приложение методов лазерной интерферометрии, направленных на повышение помехозащищенности информационных и оптико-электронных систем при регистрации и обработке оптических полей в условиях внешних аддитивных помех, рассмотрено в [30]. В [30] предложены интерферометрические методы подавления аддитивных помех применительно к пассивным и активным интерферометрам. Появились новые направления. Среди них доплеровская интерферометрия [31] предназначенная для измерений скорости, не имеет аналогов в классической интерферометрии. Доплеровские системы используются для измерений скорости различных объектов и изменений расстояния до них (относительной дальности). Принцип действия основан на хорошо известном эффекте Доплера, который наблюдается как для звуковых, так и для электромагнитных волн. Принцип действия заключается в том, что два когерентных световых луча направляются в исследуемую область, полученную путем деления амплитуды или волнового фронта лазерного луча. На пересечении этих лучей создается интерференционное поле с изменением максимумов и минимумов. При пересечении этого поля рассеивающей частицей интенсивность рассеянного света изменяется. Когда рассеянный свет собирается линзой и передается в приемник, его выходной ток содержит переменную составляющую с частотой, пропорциональной скорости частицы. Поскольку длина когерентности лазеров на углекислом газе в принципе может достигать сотен и тысяч километров, возможно создание интерференционных устройств с рабочими диапазонами, которые

соответствуют допустимой разности пути вблизи длины когерентности используемого излучения [15].

Развивается направление лазерной интерферометрии волоконных структур на базе волоконно-оптических интерферометров, разрабатывающее волоконно-оптические датчики, а также высокочувствительная интерферометрия на основе деформографов для изучения природных сейсмических процессов.

В офтальмологии применяется методика тестирования сетчатки при катаракте с использованием интерференционной картины. Если обнаружено различие спектров отражения здоровой и патологической ткани с перестраиваемыми лазерами, могут быть обнаружены локально пораженные участки как на коже, так и внутри тела (желудочно-кишечный тракт, полость рта, глазное дно и т. д.).

Согласно [17] достигнутые в «долазерный» период точности оптических измерений составляли в абсолютных величинах 0.02 – 0.05 *мкм* для расстояний порядка 100 *мм* и 0.2 *мкм* для расстояний порядка 1000 *мм*. С развитием лазера в качестве источника когерентного света стало возможным распространить метод оптической интерферометрии на значительные расстояния. Расстояния порядка нескольких сантиметров измерялись обычными источниками света. Благодаря когерентности лазеров, лазерные интерферометры могут успешно работать на расстояниях до 1 *км*.

Задача создания когерентного источника света была решена с появлением лазеров, которые используют принципиально другой метод высвечивания возбужденных атомов, что позволяет получать когерентные световые пучки очень высокой интенсивности, несмотря на некогерентный характер возбуждения одного атома. Слово «лазер» является аббревиатурой от термина «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation», - увеличение света вследствие индуцированного или, как его иногда называют, стимулированного излучения квантов. Обобщенная лазерная схема состоит

из лазерно-активной среды, системы накачки - источника напряжения и оптического резонатора.

Принцип действия лазера основан на когерентном усилении света средой с инверсной заселенностью уровней.

Спонтанное излучение одного из возбужденных атомов активной среды до того, как оно покинет объем V , может привести к вынужденным переходам других возбужденных атомов и, как следствие, к усилению. Важно, что усиление зависит от того, как волна движется в среде, то есть от направления. Если мы поместим активную среду в самый простой оптический резонатор, как в интерферометре Фабри-Перо, волна, движущаяся вдоль оси интерферометра, будет колебаться между зеркалами. Усиливаясь, она достигает зеркала, отражается от него и движется в противоположном направлении, продолжает усиливаться, а затем отражается от второго зеркала и т. д. С каждым «проходом» интенсивность волны усиливается. Если усиление на длине L больше потерь, понесенных волной во время отражения, волна увеличивается с каждым проходом, пока плотность энергии в волне не достигнет определенного предела. Увеличение плотности энергии прекращается, когда энергия, выделяемая принудительными переходами, которая пропорциональна плотности энергии, не может быть компенсирована энергией, затрачиваемой на возбуждение атомов в активной среде. В итоге между зеркалами возникает стоячая волна, и поток излучения выходит через полупрозрачные зеркала.

Если сравнить интенсивность лазерного излучения с интенсивностью излучения абсолютно черного тела в тех же спектральных и угловых интервалах, получаются фантастически высокие температуры, которые в миллиарды раз превышают реально достижимые температуры в тепловых источниках света. К тому же, низкая расходимость излучения дает возможность использовать обычные оптические системы для концентрации энергии света в пренебрежимо малых объемах, создавая огромные плотности энергии. Высокая направленность и когерентность открывают новые

возможности для использования светового излучения, в которых «не лазерные» источники света неприменимы.

Простейшим лазером является интерферометр Фабри-Перо, с помещенной в него активной средой с достаточно большим усилением. Оптические резонаторы в лазерах бывают с плоскими зеркалами, сферическими, плоскими и сферическими комбинациями и т. д.

В оптических резонаторах, которые обеспечивают обратную связь в лазерах, возможны возбуждения только определенных типов колебаний электромагнитного поля, называемые модами резонатора или собственными колебаниями. Режимы характеризуются формой и частотой, т.е. пространственным распределением поля электромагнитных колебаний. В резонаторе с плоскими зеркалами возбуждаются преимущественно моды колебаний, которые соответствуют плоским волнам, распространяющимся вдоль оси резонатора. Одномодовые лазеры характеризуются высокой монохроматичностью. Такой резонатор позволяет получать излучение с высокой направленностью.

Существующие лазеры различаются: 1) методом генерации населенностей в инверсионной среде или, как говорится, методом накачки (оптическая накачка, электронная ударная, химическая накачка и т. д.; 2) конструкцией резонатора; 3) режимом работы (импульсный, непрерывный) 4) рабочей средой (твердые диэлектрики, полупроводники, газы, жидкости);. Все эти различия определяются требованиями приложений, которые часто предъявляют очень разные требования к свойствам лазеров.

Газовые лазеры. Основным преимуществом газов в качестве активной среды лазеров является высокая оптическая однородность. Поэтому газовые лазеры представляют большой интерес для тех научных и технических применений, которые требуют высочайшей направленности и монохроматичности излучения. После первого газового лазера на смеси гелия и неона (1960 г.) было создано огромное количество различных газовых лазеров с использованием квантовых переходов нейтральных

атомов, молекул и ионов на частотах от ультрафиолетовых до дальних инфракрасных областей спектра.

Среди лазеров непрерывного действия в видимой и ближней инфракрасной областях спектра наиболее широко используется гелий-неоновый лазер. Этот лазер представляет собой газоразрядную трубку, заключенную в оптический резонатор, заполненный смесью He и Ne. Он генерирует излучение в красной области спектра с $\lambda = 0,6328$ мкм, а также в ближней инфракрасной области – $\lambda = 1,15$ мкм, и $\lambda = 3,39$ мкм. Типичные размеры трубки: диаметр несколько мм, длина несколько десятков см или 1—2 м;. Типичная мощность генерации - десятки мвт.

Мощный непрерывный лазер в видимой области спектра представляет собой аргоновый лазер. Он работает на квантовых переходах Ar-иона в синей и зеленой областях спектра: $\lambda = 0,5145$ мкм и $\lambda = 0,4880$ мкм. Выработка электроэнергии составляет десятки вт. Конструктивно аргоновый лазер намного сложнее, чем гелий-неоновый (требуется охлаждение и циркуляция газа). Наиболее мощным газовым лазером является CO₂-лазер. При непрерывной работе CO₂-лазера достигается мощность в десятки квт.

Газовые лазеры могут обеспечить гораздо более высокое монохроматическое излучение, чем лазеры всех других типов. Однако увеличение монохроматичности и стабильности частоты лазеров представляет ряд как технических, так и фундаментальных трудностей. Различные помехи, которые приводят к «раскачке» лазерной частоты, можно разделить на два типа: физические, влияющие на частоту рабочего перехода и технические, влияющие на собственные частоты резонатора. Первое можно отнести к зеркалам резонатора с дрожанием, изменению длины из-за теплового расширения и так далее. Ко второй группе относятся влияние внешних электрических и магнитных полей, изменение свойств активной среды и мощности накачки. Чтобы уменьшить роль этих факторов, существуют соответствующие методы защиты. Например, разрабатываются методы автоматической настройки резонаторов с использованием явлений

магнитострикции, пьезоэлектрических эффектов и т. д. Основой этих методов является система слежения, которая обнаруживает изменение параметров резонаторов и обеспечивает подходящую компенсацию. Наиболее существенным фактором, ограничивающим стабильность частоты лазеров, являются колебания давления в рабочем объеме. От давления зависит форма спектральной линии в газе, поскольку столкновения атомов и молекул приводят к уширению и сдвигу спектральных линий, пропорциональных давлению. Колебания давления приводят к колебаниям частоты рабочего квантового перехода. Следовательно, активная среда должна иметь минимально возможное давление. С другой стороны, снижение давления приводит к уменьшению усиления. Это противоречие можно частично разрешить путем стабилизации частоты лазерного излучения при помощи поглощающей ячейки в резонаторе. В поглощающей ячейке находится газ со спектральной линией поглощения, которая перекрывает линию, соответствующую рабочему переходу активной среды. Например, метан CH_4 предназначен для гелий-неонового лазера для линии $\lambda = 3,39$ мкм. Обнаружено, что можно стабилизировать частоту лазерного излучения относительно частоты линии поглощения метана, причем в условиях, когда давление поглощающего газа намного ниже, чем у активного. С помощью абсорбирующей ячейки была достигнута относительная стабильность частоты излучения $\frac{\Delta\nu}{\nu} \sim 10^{-13} - 10^{-14}$.

Среди видимых и инфракрасных лазеров полупроводниковые лазеры занимают особое положение по ряду своих свойств. В полупроводниках возможно очень большое усиление от $\sim 10^2 - 10^3 \text{ см}^{-1}$, так что размеры полупроводникового лазера могут быть сделаны очень маленькими, порядка долей мм. GaAs, CdS, InAs, InSb, ZnS и другие полупроводниковые лазеры позволяют практически полностью покрыть видимый и ближний инфракрасный диапазоны. Полупроводниковые лазеры используются наиболее эффективно в тех случаях, когда требования к когерентности и

направленности не очень велики, но требуются небольшие размеры и высокая эффективность. Полупроводниковые лазеры превосходят лазеры всех других типов плотности и величиной КПД. Важной особенностью полупроводниковых лазеров является возможность очень быстрой настройки частоты излучения и управления световым пучком, то есть модулировать интенсивность света с постоянной времени $\sim 10^{-11}$ сек.

Общим недостатком всех полупроводниковых лазеров является относительно низкая направленность излучения, связанная с их малым размером и трудностью достижения высокой монохроматичности. Последнее связано с широким спектром спонтанного излучения при функционирующих рекомбинационных переходах.

Особое внимание уделяется разработке перестраиваемых лазеров. Существует несколько типов параметрических генераторов света: лазеры с вынужденным рассеянием света и полупроводниковые лазеры, работающие в одномодовом режиме. В итоге охвачен практически весь диапазон от $\lambda = 1$ мм до видимой области, с разрешением 10^2 — 10^3 см⁻¹. Широкое использование таких лазеров в спектроскопии позволяет во многих случаях устранить необходимость в монохроматорах, спектрографах и т. д. Лазерная спектроскопия особенно важна для изучения короткоживущих продуктов.

Применение лазеров. Наряду с разработкой первых лазеров начали развиваться различные области применения. Создание лазеров устранило качественную разницу между оптикой и радиоэлектроникой. Следовательно, в принципе, все методы радиотехники могут быть реализованы в оптическом диапазоне, и малость длины волны лазера открывает ряд дополнительных перспектив.

На фоне лазерных технологий в биологии и медицине открываются большие возможности. Лазерный луч используется не только в хирургии (например, для операций на сетчатке) в качестве скальпеля, но и в терапии.

Методы лазерной локации и связи интенсивно развиваются. Локализация Луны с помощью рубиновых лазеров и специальных угловых

отражателей, доставленных на Луну, позволила повысить точность измерения расстояния Земля-Луна до нескольких сантиметров. Общее энергопотребление составляет порядка величины энергии, выделяемой при сжигании дюжины спичек (10 кДж). Используя полупроводниковые лазеры, была установлена связь со спутником. Разрабатываются лазерные методы геодезических измерений и регистрации сейсмических явлений. Лазерные гироскопы и дальнометры созданы и используются.

Мощные лазеры позволяют изучать различные явления при взаимодействии интенсивного света со средой, которая ранее была совершенно недоступна для экспериментов. В исследованиях по молекулярному рассеянию света лазерные источники значительно расширили возможности экспериментальных методов, в частности, для изучения свойств жидкого и твердого гелия (затухание второго звука, родственные состояния двух ротонов в жидком гелии и т. д.). Проведение первых исследований кинетики движения некоторых биологических объектов, например простейших, таких как бактерии.

С помощью высокочастотного стабильного гелий-неонового лазера можно создать единый оптический стандарт для длины (длины волны) и времени (частоты). [32].

Лазерная интерферометрия является интенсивно развивающейся областью прикладной оптики и метрологии, которая имеет множество применений как в научных экспериментах, так и в промышленной инженерии.

Как правило, измерительное оборудование изготавливается по схеме интерферометра Майкельсона или его различных модификаций (также используются другие интерферометры, в частности интерферометр Фабри-Перо). В своей простейшей форме, лазерный интерферометр для точного измерения линейных перемещений на больших расстояниях содержит два плеча интерферометра Майкельсона, в котором опорное зеркало и светоделительное устройство установлено в непосредственной близости от

лазера на едином основании, а зеркало измерительного канала находится на стабильном основании на удалении L от лазера. Свет, возвращающийся из дальнего отражателя, интерферирует со светом от локального зеркала и образует классическую интерференционную картину. Постоянное давление должно поддерживаться в измерительном канале (обычно он вакуумируется), чтобы ослабить влияние искажений волнового фронта, и чтобы интерференционная картина была отчетливо видна, а также уменьшить поправки из-за влияния значения показателя преломления. Максимумы интенсивности получают, когда L кратно целому числу половинных длин лазерного излучения. Если L изменяется, полосы перемещаются в поле анализа. Обнаруживая движение полос с помощью фотоприемника, расстояние ΔL может быть измерено в полуволнах $\lambda / 2$. Для He-Ne-лазера с $\lambda = 0,6328$ мкм и, следовательно, для интерферометра с измерительным каналом длиной 1 км наименьший относительный размер обнаруженной деформации составляет $3 \cdot 10^{-10}$. Обратите внимание, что в этом приборе стандарт длины уже не близок к L , как в обычном тензодатчике, а сравним с длиной волны.

При разработке отечественных промышленных интерферометров большой вклад внесли исследования, выполненные в Институте автоматики и электрометрии СО РАН [17]. Сотрудники этого института разработали приборы ИПЛ-1 и ИПЛ-2 с пределом измерения 5 м с погрешностью измерения до 2 мкм / м со скоростью перемещения подвижного отражателя до 1,5 м / мин. Позже были разработаны устройства ИПЛ-10 с диапазоном измерения до 60 м и погрешностью 0,2 мкм, а также ИПЛ-30, с помощью которого можно измерять линейные смещения до 30 м, а также значения углов до 5° с погрешностью $12''$. Выпуск этих устройств был значительно упрощен благодаря внедрению газовых лазеров ЛГН-302 и ЛГН-303 с длиной волны $\lambda = 0,6328$ мкм, излучающей мощностью до 1 мВт и нестабильностью частоты генерации в течение периода 10 с. не хуже $2 \cdot 10^{-9}$.

Модернизацией классических методов лазерной интерферометрии является активная интерферометрия или интерферометрия с оптической обратной связью [22 -26]. При этом используется частотная модуляция излучения на основе электрооптического, акустооптического и пьезо-эффектов. Частотную модуляцию интерференционного сигнала обеспечивают также путем суперпозиции двух волн разной оптической частоты. Один из методов частотной модуляции, основанный на известном свойстве полупроводниковых лазеров изменять частоту излучения под воздействием изменений инжекционного тока, позволил определить расстояние до объекта при использовании синусоидальной частотной модуляции [2] и провести одновременные измерения дальности и скорости диффузно рассеивающих объектов с линейной частотной модуляцией [3].

1.3. Оптическая интерферометрия волоконных структур

В настоящее время возрос интерес к интерферометрическим методам измерений параметров оптических волокон, которые нашли применение в волоконных лазерах, активная среда и резонатор которых являются элементами оптического волокна. Волоконные лазеры являются одним из самых распространенных и перспективных видов твердотельных лазеров, одномодовые итербиевые лазеры с полупроводниковой накачкой достигают мощности 10 кВт, а маломодовые 50 кВт [33]. Максимальная оптическая мощность коммерческих волоконных лазеров для обработки материалов достигает 100 кВт [34], при этом длина когерентности составляет всего 0,5 мм. В 1964 г. впервые появился волоконный лазер с активной сердцевиной, легированной неодимом [35]. Развитие технологий позволило получать все больше чистых кварцевых стекол и использовать все более эффективные источники оптической накачки. Непрерывный волоконный лазер с накачкой полупроводниковым диодом был впервые продемонстрирован в [36].

Волоконные интерферометры, использующие волоконную конфигурацию известных схем интерферометров на объемных оптических

элементах, нашли широкое применение при передаче и обработке информации [37-39].

Основой волоконного лазера является многослойное оптическое волокно, имеющее активную кварцевую сердцевину, легированную редкоземельными ионами, оболочку из кварцевого стекла и полимерную защитную оболочку. Накачка осуществляется путем многомодового облучения полупроводниковых диодов на двойной полупроводниковой гетероструктуре InGaAs / GaAs. Исследование параметров состояния активной среды волоконного лазера является важной научной и практической задачей. Основным параметром, по которому можно судить о состоянии активной среды при больших мощностях накачки, является температура. В активных световодах, легированных редкоземельными (РЗ) ионами, в условиях лазерной генерации часть мощности оптической накачки переходит в тепло. Однако с точки зрения теплового нагрева волоконный лазер имеет преимущество перед другими твердотельными лазерами из-за более высокого отношения площади поверхности к объему активной среды, благодаря чему может быть достигнута более высокая плотность мощности излучения в сердцевине оптического волокна (до 10^6 Вт/см³).

Влияние нагревательных и термоупругих воздействий на свойства активных оптических волноводов и максимально достижимую светоотдачу рассмотрено подробно в [37]. Измерениям температуры в активной среде волоконных лазеров посвящены работы [40,41]. Необходимость таких измерений связана с появлением мощных лазерных источников, имеющих выходную мощность порядка нескольких сотен ватт или более, при которых температура активных волокон значительно увеличивается с увеличением мощности лазера. В этих работах используются известные тепловизорные измерения, требующие дополнительной дорогостоящей аппаратуры, а также спектральные методы, которые являются перспективными методами измерения температуры, но поглощение волоконных решеток в волоконной сердцевине вносит дополнительные потери излучения.

Метод интерференции, впервые реализованный для активных волокон на основе интерферометра Маха-Цендера, лишен этих недостатков [42]. Заметим, что чрезвычайно высокая чувствительность волоконных интерферометров к изменению температуры и давлению окружающей среды требует тщательной стабилизации этих параметров. Волоконный лазер был встроен в одно из плеч волоконного интерферометра Маха-Цендера. Изменение разности фаз волны, проходящей через различные плечи интерферометра, с изменением показателя преломления вследствие нагрева активной среды лазера измеряли путем пропускания зондирующего излучения. Амплитуда интерферирующего сигнала зонда, измеренная фотоприемником, определяла нагрев оптической среды.

Сочетание методов волоконной оптической интерферометрии и радиочастотной спектроскопии позволили экспериментально определить разогрев разных полимерных оболочек волокна и определить температурный профиль волокна, а также измерить зависимость разности температур сердцевины и оболочки активного световода от мощности накачки [43].

Теоретически отклик волоконного интерферометра Маха-Цендера с учетом влияния поляризационных рассогласований в волоконных элементах изучен применительно к дистанционному волоконно-оптическому интерферометру Маха-Цендера на основе двулучепреломляющих световодов с поляризационным разделением каналов, работающих в режиме регистрации акустических воздействий [44].

Разработке физических основ новых методов оптических измерений, использующих интерференционные эффекты, возникающие при релеевском рассеянии света в одномодовых оптических волокнах, посвящена работа [45].

Волоконная интерферометрия успешно применяется в областях, использующих волоконно-оптические линии передачи [46], сбор данных с применением методов фазовой модуляции и интерферометрические способы регистрации сигналов [47], волоконно-оптические устройства для управления и обработки сигналов с антенных систем [48].

Широкое применение волоконная интерферометрия нашла при разработке высокочувствительных интерферометрических датчиков физических величин: магнитного и электрического полей, акустических колебаний, температуры, давления, микроперемещений, ускорения, углов поворота и др. [49,50].

В волоконных интерференционных датчиках изменение физических величин преобразовывается в изменение геометрической или оптической разности хода интерферирующих лучей с помощью чувствительного элемента [30]. Волоконные датчики подразделяются на четыре класса, в соответствии с которыми параметры оптической волны, распространяющейся по волокну, используются для получения информации об измеренном физическом эффекте: амплитуда электрического поля E (амплитудные датчики), фаза Φ (фазовые датчики), состояние и направление поляризации электрического вектора (поляризационные датчики) или частота (частотные датчики). В амплитудных датчиках или датчиках с модуляцией интенсивности внешнее воздействие модулирует интенсивность световой волны в выходном волокне; в фазовых датчиках под воздействием внешнего фактора меняется фаза на выходе чувствительного элемента (сенсора) и используется эффект накапливающегося изменения фазы; в поляризационных датчиках в качестве информационного параметра используется изменение поляризации; в частотных датчиках исследуемое физическое воздействие изменяет частоту генерируемого, отраженного или пропускаемого света. Датчики интенсивности, как правило, имеют малые габаритные размеры, поскольку чувствительный элемент представляет собой либо специально встроенное в волоконно-оптический тракт модулирующее устройство, либо введенную в волоконную линию нерегулярность (разрыв, изгиб и т. д.). Такие нерегулярности могут существенно изменить амплитудную характеристику передачи волокна. Другим достоинством датчиков интенсивности является их совместимость с простыми в работе и доступными системами передачи на многомодовых волокнах. Наконец, для

детектирования модулированного по интенсивности светового сигнала, применяется обычная методика фотодетектирования.

Основным методом для регистрации фазы излучения является интерферометрический метод на базе волоконных интерферометров, использующих известные схемы интерферометров и особенности волоконно-оптического распространения, такие как: 1. Интерферометр на основе изогнутого волокна. Изменение фазы оптического сигнала напрямую связано с влиянием среды на постоянную распространения основной моды; 2. Интерферометр Фабри-Перо, основанный на результате взаимодействия мод ядра и оболочки; 3. Двухмодовые волоконно-оптические интерферометры. 4. Распределённые интерферометрические датчики на основе когерентного релеевского рассеяния.

1.4. Высокочувствительная интерферометрия для изучения акустических и сейсмических процессов.

Интерференционный метод очень чувствителен к колебаниям температуры и давления, особенно к вибрациям, поэтому является привлекательным для исследования самих вибраций и взят за основу при исследовании деформационных явлений с помощью длиннобазовых лазерных интерферометров-деформографов, представляющих собой интерферометры Майкельсона.

В лазерных деформографах база достигает до 1.5 км. Чем больше база, тем выше чувствительность деформографа. Но при этом растут требования к стабильности параметров оптического пути: показателя преломления среды, стабильности давления, температуры, влажности. Возникает необходимость герметизации. Такие деформографы располагают обычно в штольнях, где пока длится эксперимент, поддерживают стабильность температуры $\sim 10^{-2}$ градуса по всей базе интерферометра, а промышленные шумы отсутствуют. В современных деформографах используются стабилизированные He-Ne и твердотельные лазеры, что позволяет обнаружить смещения земной коры с амплитудой 0,01-0,001 мкм на базах до 100 метров.

Лазерные интерферометры-деформографы широко используются в разных частях света для изучения геофизических процессов [51-53]. Уникально широкая полоса частот лазерных интерферометров позволяет наблюдать большой класс геофизических процессов в энергоактивных зонах. Как правило, оптическая часть всех лазерных измерителей деформации на основе интерферометра Майкельсона комплектуется электронной системой для определения различий в длине плеч интерферометра. В качестве примера приведем блок-схему оптико-механической части лазерного деформографа, установленного на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС), которая представлена на рисунке 3 [54]. Деформограф состоит из источника когерентного излучения – частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера «ЛГН-303М», коллиматора и интерференционного узла: полупрозрачная плоскопараллельная делительная пластина, уголкового отражателя, плоскопараллельные юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах, фотодиод с электронным блоком регистрации и лучевод. Лазерный деформограф основан на интерференционном методе измерения расстояния, в основе которого лежит изменение разницы длин пробега луча по дистанции оптической скамьи и дистанции измерения. Луч лазера, пройдя коллиматор, разделяется на полупрозрачном зеркале на два луча. Луч №1 направляется на уголкового отражателя, от которого по световоду возвращается на полупрозрачное зеркало. Луч №2, пройдя интерференционный узел, возвращается на полупрозрачное зеркало. Возвращенные лучи суммируются на полупрозрачном зеркале в одной точке, образуя интерференционную картину, которая регистрируется фотодиодом. Принцип регистрации – компенсационный, позволяющий удерживать интерференционную картину неизменной [55].

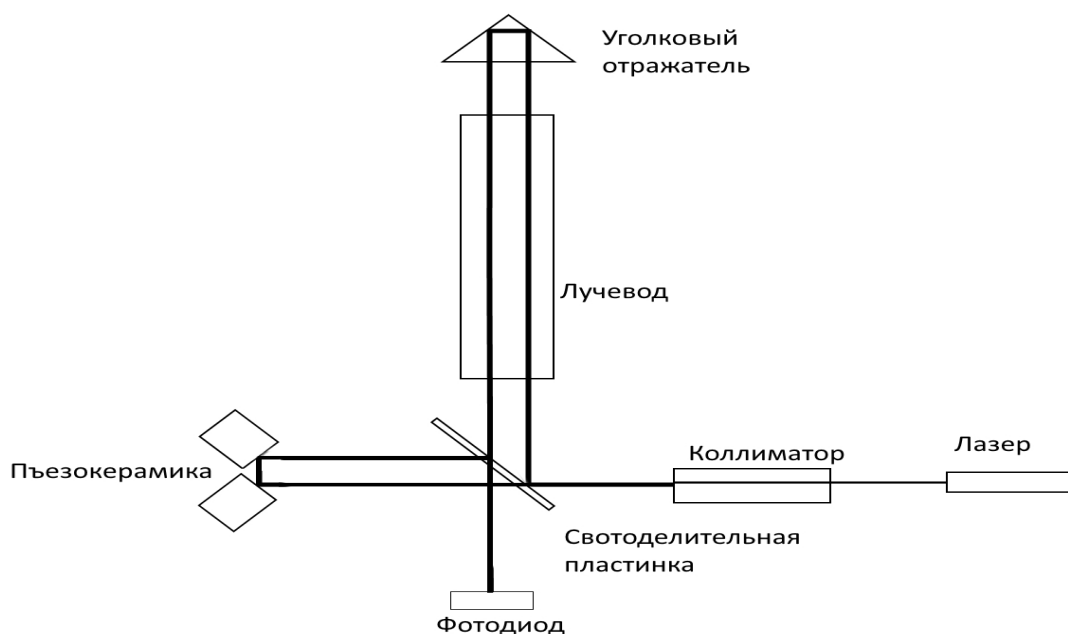


Рис. 3 Блок-схема оптико-механической части лазерного деформографа, установленного на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС).

Отечественные деформографы, позволяющие измерять деформацию земной коры и колебания Земли, были разработаны более 30 лет назад, [56-58]. В настоящее время лазерно-интерференционные комплексы установлены на морском гидрофизическом полигоне «м. Шульца», залив Петра Великого Японского моря и в районе м. Свободный Охотского моря [59]; в подземном руднике ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (г. Краснокаменск) [62]; на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) [60,61]; на Камчатке (с.Паратунка, полигон Института космических исследований распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук) [75], на подземном полигоне ФИРЭ РАН [78]; в Приэльбрусье (Баксанский деформограф) [63].

В Тихоокеанском океанологическом институте (ТОИ) ДВО РАН имеется многолетний опыт исследований деформаций земной коры, вариаций атмосферного давления и приливных движений, осуществляемых с помощью современного сейсмоакустико-гидрофизического комплекса, находящегося на МЭС «мыс Шульца»[59]. Настоящий комплекс включает в себя: лазерный деформограф неравноплечего типа на основе интерферометра

Майкельсона, лазерный измеритель вариаций давления гидросферы, лазерный нанобарограф и метеостанцию. ТОИ принимает участие в разработках и исследованиях деформографов, установленных в других зонах.

На базе комплекса ТОИ ДВО РАН и деформографов, установленных в других зонах, проводятся совместные синхронные исследования.

С 1995 г. на территории Западного Урала Горный институт УрО РАН осуществляют сейсмологический мониторинг, имея в распоряжении системы сейсмоконтроля на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) и современные стационарные региональные сеймостанции [60]. Исследования проводятся на лазерном деформографе с длиной измерительного плеча 104 метра в камере шахтного поля рудника СКРУ-2 на глубине 343 м. Данное место обеспечивает близкие к идеальным условия для размещения деформографа: вариации температуры составляют менее 2° С в год, что обеспечит высокую термостабильность измерений; место удалено от источников техногенных помех; пол камеры обеспечивает непосредственный контакт установки с коренными породами [61]. Совместно с ТОИ (деформограф на МЭС «мыс Шульца») проведены синхронные измерения вариаций напряжённо-деформационного поля Земли на Западном Урале и в Приморье.

Проведены испытания на базе 50-метрового лазерного деформографа, установленного на глубине 300 м в подземном руднике ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (г. Краснокаменск, Забайкалье), продемонстрированы возможности по регистрации колебаний и волн инфразвукового и звукового диапазонов [62].

В ГАИШ МГУ (Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, подразделение МГУ им. М.В. Ломоносова) проведен ряд исследований на базе лазерного интерферометра-деформографа с длиной измерительного плеча 75 м, предназначенного для регистрации литосферных деформаций в широком диапазоне частот.

Интерферометр расположен в Приэльбрусье, одном из наиболее активных в геодинамическом плане регионов России, что определяет спектр геофизических задач, которые могут решаться на основе полученных экспериментальных данных. Десятилетний опыт наблюдений позволил провести глубокую модернизацию всех узлов измерительного комплекса, что существенно расширило его технические возможности, повысило надежность и качество получаемой информации. Оценка предельной чувствительности лазерного интерферометра и результаты наблюдений приведены в [63]. Первые наблюдения на лазерном интерферометре ГАИШ были сделаны в 1992 году. В режиме непрерывного контроля деформаций Земли интерферометр работает с начала 1993 года. Некоторые результаты оценки спектра наблюдаемых деформаций содержатся в [64]. В 1992 году с помощью двух лазерных интерферометров провели экспериментальные синхронные наблюдения литосферных деформаций в течение длительного периода времени. — Севастопольским и Баксанским [64].

С помощью интерферометров-деформографов, разработанных в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и установленных на геофизических станциях и полигонах [56, 57, 76-78], совместно с ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН и другими организациями проведены исследования, в результате которых: зарегистрированы торроидальные моды собственных колебаний Земли; выделен полный спектр промышленных микродеформаций и установлена их связь с напряженным состоянием литосферы; выявлены аномальные деформации земной поверхности и горных пород, предвещающие региональные и удаленные землетрясения; изучены характеристики сейсмических процессов естественного и техногенного происхождения, в том числе в переходной зоне море-суша [77].

Технические характеристики деформографов, важнейшие из которых (важной является чувствительность) зависят в основном от частотной стабильности применяемых лазеров, стабильности характеристик экспериментальной установки и применяемых методик цифровой обработки

интерферометрических данных. Различные принципы стабилизации частоты оптических квантовых генераторов, включающие модуляционные методы, рассмотрены в [67, 68]. Впервые модуляционный метод предложили и реализовали Г.С. Горелик и И.Л. Берштейн для повышения чувствительности в интерферометрии [69, 70].

Способ модуляции заключается в том, что разность хода изменяется в небольших пределах в соответствии с периодическим законом, в соответствии с которым амплитудная модуляция светового потока выполняется на выходе интерферометра. С помощью фотоприемника световой поток регистрируется из небольшой области интерференционного поля, и проводится гармонический анализ электрического сигнала. Метод модуляции обеспечивает повышенную помехоустойчивость к быстрым и медленным изменениям разницы хаотических путей, которые могут происходить при неравномерном нагреве интерферометра и механическом воздействии на среду прибора.

Простое определение интенсивности света на выходе интерферометра осуществляется с помощью объективных фотометров прямого отсчета. В зоне максимальной чувствительности интерферометра погрешность измерений светового потока не превышает 1—2%, что соответствует погрешности измерения разности пути (0,002—0,004) % [98]. Такой точности достаточно для большинства промышленных интерферометров. Значительное увеличение точности в современных лазерных интерферометрах-деформографах, необходимое для исследования сейсмических процессов, достигается применением различных модуляционных методов.

Приборы на основе интерференционной модуляции включают в себя спектрометр с селективной амплитудной модуляцией и спектрометр Фурье. Эти приборы отличаются от щелевых спектрометров более высокой светосилой, так как вместо узкой входной щели используется широкая входная апертура. Используя сетку вместо входного и выходного слотов,

световой поток, поступающий в устройство, может быть увеличен во много раз. Так появились растровые приборы.

В данной диссертационной работе предлагается и реализуется новый метод частотно-фазовой модуляции в трехзеркальном интерферометре, основанный на суперпозиции двух модуляционных процессов. Один из них осуществляется с помощью электрооптического модулятора, частота модуляции задается пилообразным опорным напряжением (30 кГц) от внешнего источника, это позволяет регистрировать интерференционный сигнал и в отсутствие деформационных колебаний. Второй модуляционный процесс обусловлен изменениями длины измерительного плеча интерферометра в соответствии с деформационными колебаниями.

Результаты исследований деформационных процессов, полученные с помощью деформографов, могут служить прогностическими признаками при прогнозе землетрясений, одной из наиболее значимых проблем, стоящих перед наукой в странах, имеющих сейсмоактивные районы [71]. Однако информативность и достоверность результатов для долгосрочного и краткосрочного прогноза могут обеспечить только комплекс методов, включая методы классической геодезии [72, 73] и космической спутниковой геодезии на базе станций GPS [74]. Землетрясения пытаются предсказывать, наблюдая не только за Землей, но и за атмосферой, а точнее, за ионосферой Земли. В качестве примера можно привести данные, полученные с помощью навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС [79].

Исследования, проведенные в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН во Фрязино Московской области совместно с МЭС ТОИ ДВО РАН «мыс Шульца» и ИКИР ДВО РАН с. Паратунка Камчатского края, направлены на создание технологии раннего обнаружения опасных геодинамических процессов – землетрясений, обвально-оползневых явлений, волн цунами. Результаты исследований содержатся в данной диссертационной работе, и публикациях [65, 66].

Глава 2 Исследование влияния оптической обратной связи на параметры трехзеркального интерферометра-деформографа

Методы расчета собственных мод (резонансных частот) изолированного квазиоптического резонатора со сферическими (в двумерном случае – цилиндрическими) зеркалами весьма полно разработаны и исследованы. Однако эта двухзеркальная электродинамическая система, которая является частью каждого лазерного измерительного устройства, имеет особые характеристики при введении третьего отражающего или рассеивающего элемента. Такая ситуация всегда присутствует на практике, т.к. оптическая нагрузка не может быть абсолютно согласованной: часть отраженного и рассеянного излучения возвращается в лазерный резонатор и приводит к искажению спектральных свойств. Использование этого эффекта для выбора мод колебаний открытого резонатора, рассмотрено в [80].

Благодаря созданию высокостабильных лазеров в последние десятилетия и разработке высокоточных измерительных методов и устройств, включая интерферометрические методы и устройства, проблемы влияния несогласованной нагрузки на работу оптического генератора также могут возникать при очень низком уровне обратного отражения, которые чрезвычайно актуальны. Трехзеркальный лазерный резонатор является простейшей моделью такой электродинамической системы, где в качестве несогласованной нагрузки выступает внешнее зеркало с низким отражением. Исследования на трехзеркальных лазерных резонаторах, начавшиеся практически одновременно с разработкой первых лазеров [81, 82], все еще продолжаются [83-85], что говорит о сложности решения этой проблемы и ее большой важности для практического применения. С применением лазера в качестве источника высококогерентного излучения, например при выполнении точных интерференционных измерений, важна стабильность как интенсивности, так и частоты лазерного излучения. Влияние второго параметра особенно заметно в случае интерферометрии на больших базах.

Исследование показывает, что нестабильность частоты вызывают не только случайные изменения характеристик лазерного резонатора, но также изменения протяженности и показателя преломления среды внешнего резонатора, образованного отражающим или дифракционным оптическим элементом, таким как фотоприемник, в системе стабилизации частоты лазера. В качестве двумерной физической модели лазера с несогласованной нагрузкой мы исследуем трехзеркальный резонатор в квазиоптической аппроксимации, состоящий из полупрозрачных зеркал, поперечные размеры которых велики по сравнению с поперечными размерами лазерного луча. Исследуются три случая: среднее зеркало плоское; длины парциальных резонаторов одинаковы; резонаторы не согласованы. Используется метод интегральных уравнений для описания электромагнитного поля в трехзеркальном резонаторе. Приведены результаты экспериментальных исследований и численных расчетов для некоторых примеров реализации таких систем.

2.1. Двухзеркальный резонатор

Метод нахождения собственных частот лазерного резонатора рассмотрим на примере двумерной модели двухзеркального резонатора, состоящего из двух полупрозрачных цилиндрических зеркал S_1 и S_2 (рис.4). Эти зеркала характеризуются прозрачностями ρ_1 , ρ_2 и поперечными размерами a_1 , a_2 соответственно.

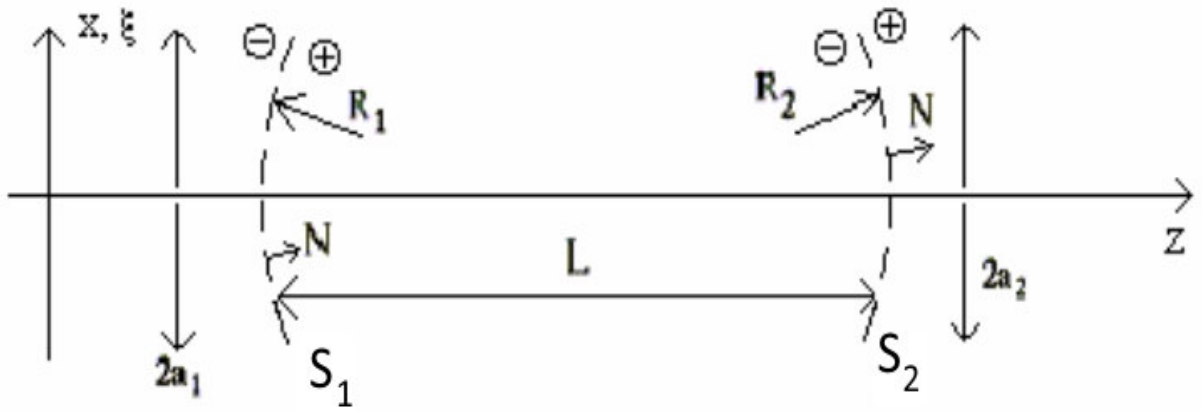


Рис. 4 . Двумерная модель двухзеркального резонатора, состоящего из двух полупрозрачных цилиндрических зеркал S1 и S2.

Пусть электрический вектор \vec{E} электромагнитной волны, падающей на двумерное цилиндрическое зеркало $S_{1,2}$, направлен перпендикулярно плоскости (x, z) . Если в качестве потенциала выбрать функцию $U(x,z)=Ey(x,z)$, удовлетворяющую волновому уравнению

$$\Delta U+k^2U=0, \quad (3)$$

то поле на каждом из полупрозрачных зеркал $S_{1,2}$ будет описываться граничными условиями [85]:

$$U^+|_{S_{1,2}}=U^-|_{S_{1,2}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial U^+}{\partial(kN)} - \frac{\partial U^-}{\partial(kN)} = \frac{1}{\rho} U, \quad (5)$$

где ρ - так называемая “прозрачность” зеркала. Если $\rho=0$, то имеем идеально отражающее зеркало, которое описывается граничным условием $U|_S=0$. Если $\rho=\infty$, то зеркало S исчезает. Физическая реализация такого зеркала – это частая (в масштабах длины волны λ) решетка из ленточных проводников. Проводники направлены вдоль оси y , коэффициент заполнения решетки определяет “прозрачность” зеркала.

Обозначим через f_1 и f_2 токи на зеркалах, т.е.

$$\left. \frac{\partial U^+}{\partial(kN)} - \frac{\partial U^-}{\partial(kN)} \right|_{S_{1,2}} = f_{1,2} \quad (6)$$

в то же время:

$$f_{1,2} = \frac{1}{\rho_{1,2}} U_{1,2} \quad (7)$$

Поле на зеркале S_1 , обозначенное нами через U_1 , создается, во-первых, локальными токами f_1 , текущими по самому этому зеркалу S_1

$$U'_1(x) = \frac{i}{2} f_1 \quad (8)$$

и, во-вторых, токами f_2 , текущими по удаленному зеркалу S_2 . Последний вклад вычисляется с помощью функции Грина свободного пространства в стандартном квазиоптическом приближении [86]:

$$U''_1(x) = \left(\frac{i}{2} \int_{-a_2}^{a_2} A_{12}(x, \xi) f_2(\xi) d\xi \right) \quad (9)$$

где: $\frac{i}{2} f_2$ – поле на втором зеркале, создаваемое текущими по нему токами;

$$A_{12}(x, \xi) = \sqrt{\frac{ik}{2\pi L}} e^{-ikL - \frac{ik(x-\xi)^2}{2L} + \frac{ikx^2}{2R_1} + \frac{ik\xi^2}{2R_2}}$$

– ядро соответствующего интегрального оператора.

Таким образом, для полного поля U_1 на зеркале S_1 имеем выражение:

$$U_1(x) = \frac{i}{2} f_1(x) + \frac{i}{2} \int_{-a_2}^{a_2} A_{12}(x, \xi) f_2(\xi) d\xi \quad (10)$$

Подставляя (10) в (7), получим одно из искомым интегральных уравнений:

$$\frac{1}{r_1} f_1(x) = \int_{-a_2}^{a_2} A_{12}(x, \xi) f_2(\xi) d\xi \quad (11)$$

где r_1 – коэффициент отражения зеркала S_1 , который связан с его прозрачностью ρ_1 формулой Френеля [87]:

$$r_1 = -\frac{1}{1 + 2i\rho_1}$$

Второе интегральное уравнение получается по аналогичной схеме и имеет вид:

$$\frac{1}{r_2} f_2(x) = \int_{-a_1}^{a_1} A_{21}(x, \xi) f_1(\xi) d\xi, \quad (12)$$

где

$$A_{21}(x, \xi) = \sqrt{\frac{ik}{2\pi L}} e^{-ikL - \frac{ik(x-\xi)^2}{2L} + \frac{ikx^2}{2R_2} + \frac{ik\xi^2}{2R_1}} \quad (13)$$

Если размеры зеркал бесконечны ($a_1 = a_2 = \infty$), то уравнения (11), (12) имеют простейшее решение в виде гауссовых пучков:

$$f_{1,2}(x) = \beta_{1,2} e^{-\frac{\alpha_{1,2} k x^2}{2}} \quad (14)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ – некоторые числа, которые подлежат определению. Для этого потребуется формула [88]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{1}{2} p x^2 + i q x\right) dx = \sqrt{\frac{2\pi}{p}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{q^2}{p}\right) \quad (15)$$

Подставим (14) в (11), (12) и учтем (15). Приравнявая показатели экспонент в левой и правой частях получившихся выражений, приходим к системе уравнений для определения величин α_1 и α_2 :

$$\left(\alpha_1 - \frac{i}{L} + \frac{i}{R_1}\right)\left(\alpha_2 + \frac{i}{L} - \frac{i}{R_2}\right) = \frac{1}{L^2} \quad (16)$$

$$\left(\alpha_1 + \frac{i}{L} - \frac{i}{R_1}\right)\left(\alpha_2 - \frac{i}{L} + \frac{i}{R_2}\right) = \frac{1}{L^2} \quad (17)$$

Эти уравнения имеют следующие решения:

$$\alpha_{1,2} = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{1 - \frac{L}{R_{1,2}}}{1 - \frac{L}{R_{2,1}}} - \left(1 - \frac{L}{R_{1,2}}\right)^2} \quad (18)$$

Для коэффициентов β_1 и β_2 (12) из оставшихся частей выражений составляем систему однородных алгебраических уравнений. Приравнявая к нулю детерминант этой системы, получим дисперсионное уравнение для определения комплексных частот резонатора:

$$e^{2ikL} = ir_1r_2 \sqrt{\frac{\alpha_1 - \frac{i}{L} + \frac{i}{R_1}}{\alpha_1 + \frac{i}{L} - \frac{i}{R_1}}} \quad (19)$$

При идеально отражающих зеркалах, когда $r_1 = r_2 = -1$, собственные частоты k являются вещественными числами. В приближении плоских зеркал ($R_1=R_2=\infty$) уравнение (19) для двухзеркального резонатора преобразуется к виду:

$$r_1r_2e^{-2ikL} = 1 \quad (20)$$

2.2. Трехзеркальный резонатор.

Теперь перейдем к трехзеркальному резонатору (рис.5). По аналогии с двухзеркальным резонатором для токов f_1, f_0, f_2 на каждом из трех зеркал S_1, S_0, S_2 запишем систему интегральных уравнений:

$$\frac{1}{r_1} f_1 = A_{10} f_0 + A_{12} f_2 \quad (21)$$

$$\frac{1}{r_0} f_0 = A_{01} f_1 + A_{02} f_2 \quad (22)$$

$$\frac{1}{r_2} f_2 = A_{21} f_1 + A_{20} f_0 \quad (23)$$

где r_1, r_0, r_2 – коэффициенты отражения зеркал, $A_{10} \dots A_{21}$ – ядра соответствующих интегральных операторов, учитывающих для поля на каждом из зеркал вклады токов на двух других зеркалах, находящихся на расстоянии L_1, L_2 , или $L_1 + L_2$, например:

$$A_{12} = \sqrt{\frac{ik}{2\pi(L_1 + L_2)}} \exp\left(-ik(L_1 + L_2) - \frac{ik(x - \xi)^2}{2(L_1 + L_2)} + \frac{ikx^2}{2R_1} + \frac{ik\xi^2}{2R_2}\right) \quad (24)$$

В случае неограниченных зеркал решение системы трех интегральных уравнений (21)-(23) можно (по аналогии с системой двух интегральных уравнений (11), (12)) искать в виде:

$$f_{1,0,2}(x) = \beta_{1,0,2} \exp\left(-\frac{\alpha_{1,0,2} kx^2}{2}\right) \quad (25)$$

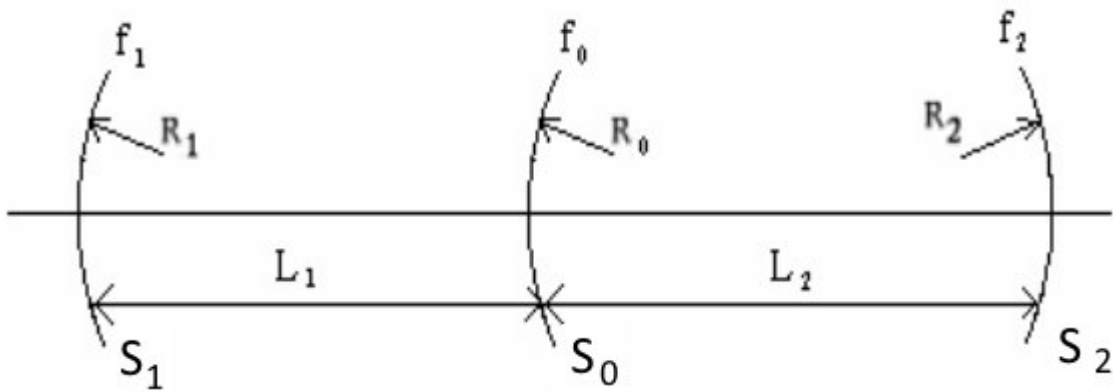


Рис. 5 Двумерная модель трехзеркального резонатора, состоящего из двух полупрозрачных цилиндрических зеркал S1, S2 и S3.

Для того чтобы показатели экспонент во всех слагаемых в уравнениях (21)-(23), получаемых в результате интегрирования с применением (15) были одинаковы, необходимо, чтобы выполнялись условия согласования размеров пятен на зеркалах во всех трех парциальных двухзеркальных резонаторах

S_1S_0 , S_0S_2 и S_1S_2 . Одно из таких условий имеет вид:

$$\frac{1}{L_1^2} \frac{\frac{1}{L_1} - \frac{1}{R_0}}{\frac{1}{L_1} - \frac{1}{R_1}} - \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{R_0} \right)^2 = \frac{1}{L_2^2} \frac{\frac{1}{L_2} - \frac{1}{R_0}}{\frac{1}{L_2} + \frac{1}{R_2}} - \left(\frac{1}{L_2} - \frac{1}{R_0} \right)^2 \quad (26)$$

Если это условие не выполнено, то простого решения системы в виде гауссовых функций не существует.

Систему из трех уравнений (21)-(23) можно свести к системе из двух уравнений. Для этого достаточно подставить f_0 из (21) в (22) и (23):

$$\frac{1}{r_1} f_1 = r_0 A_{10} A_{01} f_1 + (A_{12} + r_0 A_{10} A_{02}) f_2 \quad (27)$$

$$\frac{1}{r_2} f_2 = (A_{21} + r_0 A_{20} A_{01}) f_1 + r_0 A_{20} A_{02} f_2$$

Эта система имеет более сложную, чем (11), (12) структуру. Матрица, стоящая в правой части (27), имеет ненулевые диагональные элементы. Если промежуточное зеркало имеет неограниченные размеры ($a_0 = \infty$), то

$$A_{10} A_{02} = A_{12} \quad (28)$$

$$A_{20} A_{01} = A_{21}$$

где A_{12} и A_{21} определены формулами типа (24). Подставляя (28) в (27), получим:

$$\frac{1}{r_1} f_1 = r_0 A_{10} A_{01} f_1 + t_0 A_{12} f_2 \quad (29)$$

$$\frac{1}{r_2} f_2 = t_0 A_{21} f_1 + r_0 A_{20} A_{02} f_2 ,$$

где $t_0 = \frac{2i\rho_0}{1+2i\rho_0}$ – коэффициент прохождения [87], ρ_0 - прозрачность среднего зеркала S_0 , и учтено соотношение непрерывности для коэффициентов Френеля: $1 + r = t$.

Далее будем рассматривать ситуацию, когда промежуточное зеркало неограниченное и плоское ($a_0=\infty$, $R_0=\infty$).

В частном случае, если неограниченными и плоскими являются все три зеркала ($a_{1,0,2} = \infty$, $R_{1,0,2} = \infty$), то функции f_1, f_2 в (29) не зависят от x (25), т.е. являются константами. В результате можно получить однородную систему из двух линейных алгебраических уравнений для определения f_1 и f_2 . Равенство нулю детерминанта этой системы дает соответствующее дисперсионное уравнение для вычисления собственных частот трехзеркального резонатора:

$$r_1 \left[r_0 + \frac{t_0^2 r_2 e^{-2ikL_2}}{1 - r_0 r_2 e^{-2ikL_2}} \right] e^{-2ikL_1} = 1 \quad (30)$$

Квадратная скобка в (30) представляет собой коэффициент отражения от системы двух зеркал $S_0 S_2$, а уравнение (30) имеет стандартную форму дисперсионного уравнения (19) для двухзеркальной системы.

Приближение $L_1=L_2=L$

Рассмотрим решение системы интегральных уравнений (29), когда парциальные резонаторы имеют одинаковые длины: $L_1=L_2=L$, а радиусы R_1 и R_2 при этом могут быть различными (напомним, что $R_0=\infty$). Если $R_1=R_2$, то, очевидно, будет выполнено условие согласования. Обозначим

$$e^{2ikL} = \mu \quad (31)$$

тогда система интегральных уравнений (29) примет вид:

$$\frac{\mu}{r_1} f_1 = r_0 B_{11} f_1 + t_0 B_{12} f_2 \quad (32)$$

$$\frac{\mu}{r_2} f_2 = t_0 B_{21} f_1 + r_0 B_{22} f_2 ,$$

где ядра определяются формулами вида:

$$B_{12} = \sqrt{\frac{ik}{4\pi L}} \exp\left(-\frac{ik(x-\xi)^2}{4L} + \frac{ikx^2}{2R_1} + \frac{ik\xi^2}{2R_2}\right) \quad (33)$$

По существу, уравнение (31), где величина μ является собственным числом однородной задачи (32), представляет собой дисперсионное уравнение для нахождения комплексных частот $k = k' + ik''$ резонатора. Заметим, что ядра (33) слабо зависят от k , поэтому и правая часть (31) будет слабо зависеть от k .

Наконец, рассмотрим практически важный случай, когда промежуточное плоское зеркало является сильно отражающим. Для решения системы интегральных уравнений (32) воспользуемся методом возмущений

При $t_0 \rightarrow 0$ решение системы интегральных уравнений ищем в виде:

$$f_1 = \beta_1 f_1^{(0)} \quad (34)$$

$$f_2 = \beta_2 f_2^{(0)}$$

где принято обозначение $f_{1,2}^{(0)}$ для собственных функций парциальных резонаторов $S_1 S_0$ и $S_0 S_2$, амплитуды β_1 и β_2 подлежат определению.

Функции f_1^0 и f_2^0 имеют вид:

$$f_{1,2}^0(x) = e^{-\frac{\alpha_{1,2} k x^2}{2}} , \quad (35)$$

где

$$\alpha_1^2 = \frac{1}{R_1} \left(\frac{1}{L} - \frac{1}{R_1} \right), \quad R_1 > L \quad (36)$$

$$\alpha_2^2 = \frac{1}{R_2} \left(\frac{1}{L} - \frac{1}{R_2} \right), \quad R_2 > L$$

Умножая первую строчку в (32) на $f_1(x)$, вторую – на $f_2(x)$ и произведя интегрирование, систему интегральных уравнений можно привести к виду:

$$\frac{\mu}{r_1} f_1 \cdot f_1 = r_0 f_1 \cdot B_{11} f_1 + t_0 f_1 \cdot B_{12} f_2 \quad (37)$$

$$\frac{\mu}{r_2} f_2 \cdot f_2 = t_0 f_2 \cdot B_{21} f_1 + r_0 f_2 \cdot B_{22} f_2 ,$$

где точкой обозначены интегралы, например:

$$f_1 \cdot f_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(x) f_1(x) dx \quad (38)$$

Подставляя (34) в (37) и произведя соответствующие вычисления, получим характеристическое уравнение

$$\left(\mu + r_0 \mu_1^0 \right) \left(\mu + r_0 \mu_2^0 \right) = \frac{ir_1 r_2 t_0^2 \sqrt{\alpha_1 \alpha_2}}{L \left[\left(\alpha_1 + \frac{i}{2L} - \frac{i}{R_1} \right) \left(\alpha_2 + \frac{i}{2L} - \frac{i}{R_2} \right) + \frac{1}{4L^2} \right]} \quad (39)$$

где принято обозначение $\mu_{1,2}^0$ для собственных значений парциальных резонаторов $S_1 S_0$ и $S_0 S_2$.

Если резонаторы согласованы, т.е. $R_1 = R_2 = R$, с учетом $\mu_1^0 = \mu_2^0 = \mu^0$, характеристическое уравнение (39) можно привести к виду

$$\left(\mu + r_0 \mu^0 \right)^2 = t_0^2 \left(\mu^0 \right)^2 \quad (40)$$

т.е.

$$\mu_{1,2} = \mu^0(-r_0 \pm t_0) \quad (41)$$

или

$$\mu_{1,2} = \mu^0 \frac{1 \pm 2i\rho_{1,2}}{1 + 2i\rho_{1,2}} \quad (42)$$

Если зеркала идеально отражающие ($r_1=r_2=-1$), то модули каждого из сомножителей в (42) равны единице. Поэтому собственные частоты, найденные из характеристического уравнения (31) вещественны. В случае плоских зеркал $\mu^0=1$ из (42) вытекают два условия:

$$e^{2ikL} = 1 \quad (43)$$

$$e^{2ikL} = \frac{1 - 2i\rho}{1 + 2i\rho}$$

Первое уравнение описывает нечетные колебания, второе – четные (рис.6).

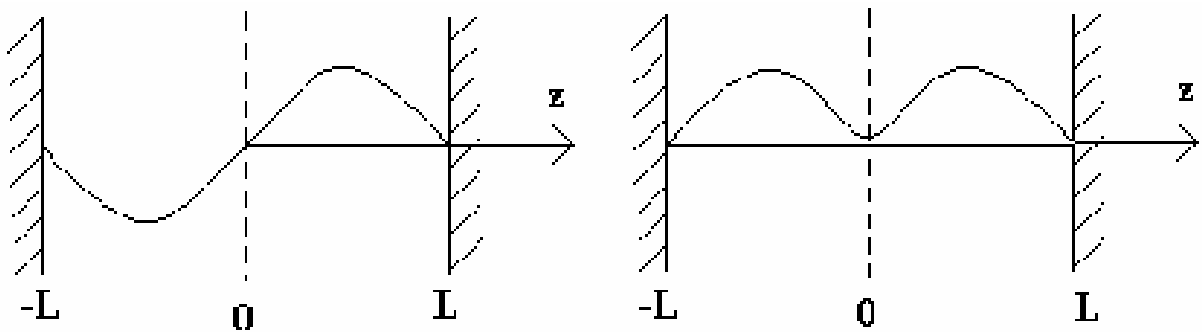


Рис. 6 Четные и нечетные колебания.

Для несогласованных резонаторов ($R_1 \neq R_2$) уравнение (39) имеет вид

$$(\mu + r_0\mu_1^0)(\mu + r_0\mu_2^0) = t_0^2\mu_1^0\mu_2^0\eta, \quad (44)$$

где

$$\eta = \frac{2\sqrt{R_1\alpha_1 R_2\alpha_2}}{R_1\alpha_1 + R_2\alpha_2} \quad (45)$$

Вещественная величина η может принимать значения от нуля до единицы. При полном согласовании пучков $\eta=1$. При полном рассогласовании $\eta \rightarrow 0$. Величины α_1 и α_2 характеризуют размеры пятен мод на цилиндрических зеркалах R_1 и R_2 в парциальных резонаторах (см.(35) и рис.7).

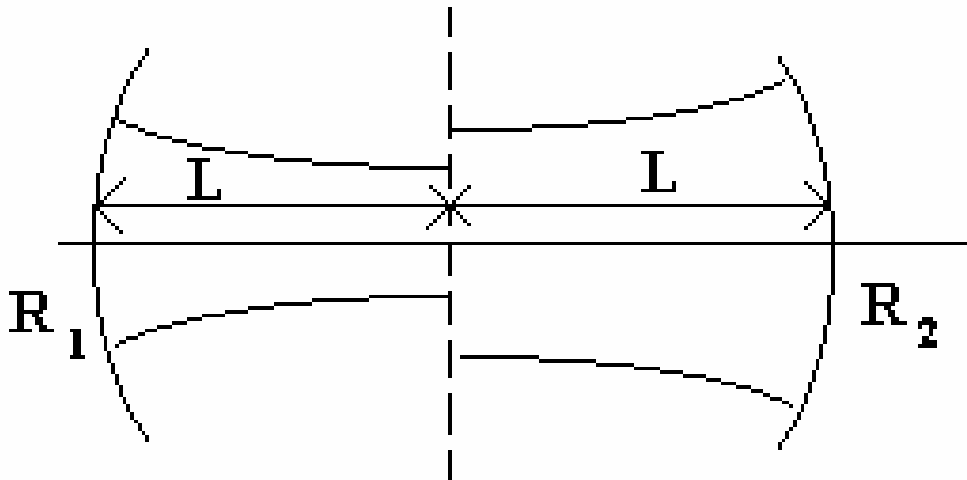


Рис. 7. Несогласованные резонаторы.

Таким образом, коэффициент η является параметром, который характеризует степень соответствия пятен мод соседних резонаторов на общей плоской стенке (зеркале) резонатора. Уравнение (44) имеет решения:

$$\mu = -\frac{r_0(\mu_1^0 + \mu_2^0)}{2} \pm \sqrt{\frac{r_0^2(\mu_1^0 - \mu_2^0)^2}{4} + \eta t_0^2 \mu_1^0 \mu_2^0} \quad (46)$$

Пусть размеры пятен парциальных мод сильно отличаются, т.е. $\eta \rightarrow 0$.

Тогда получим

$$\mu_1 = -r_0\mu_1^0, \quad \mu_2 = -r_0\mu_2^0 \quad (47)$$

Если даже внешние зеркала абсолютно отражающие ($r_1 = r_2 = -1$), то

$$|\mu_1| = |r_0| < 1, \quad |\mu_2| = |r_0| < 1 \quad (48)$$

Из (48) следует, что собственные частоты будут комплексными. На первый взгляд затухание собственных колебаний выглядит странным, т.к. внешние зеркала были идеальными и имели неограниченные размеры, а внутреннее полупрозрачное зеркало не вносило потерь ($|r_0|^2 + |t_0|^2 = 1$). Объяснение этому эффекту дано в обзоре [80] на странице 1351. Оказывается, что при несовпадении положений каустик парциальных резонаторов часть мощности излучения уходит в сторону.

Как следует из (47) при сильном рассогласовании третье внешнее зеркало, расположенное за плоским полупрозрачным зеркалом, по существу не оказывает влияния на режим колебаний. Потери резонатора обязаны частичной прозрачности плоского зеркала. При этом есть колебания, сосредоточенные либо в левой, либо в правой частях этого резонатора. Однако, нарушение равенства длин резонаторов $L_1=L_2=L$ может приводить к заметному влиянию на положение собственных частот даже при сильном рассогласовании, о чем свидетельствуют расчеты для плоского трехзеркального резонатора [89] и соответствующие эксперименты с высокоточными лазерными интерферометрами.

2.3 Численное моделирование лазерного резонатора с несогласованной нагрузкой

Для апробации полученных в предыдущем разделе результатов нами выполнено численное моделирование поведения собственных частот трехзеркального лазерного резонатора.

Используя дисперсионные уравнения (20) и (30), можно вычислить сдвиг частоты ($k' - k$) двухзеркального резонатора S_1S_0 при добавлении дополнительного третьего зеркала S_2 . В приближении слабо связанных резонаторов:

$$|r_2| \ll |r_0|$$

получим:

$$k' - k = -\frac{|r_2| (1 - |r_0|^2)}{2|r_0| L_{10}} \sin(2k'L_{02} + \Phi) , \quad (49)$$

где Φ – постоянная фазовая добавка, определяемая параметрами зеркал резонатора [89].

Если выполняется условие:

$$k' - k \ll \frac{1}{L_{02}} , \quad (50)$$

то сдвиг частоты (49) является синусоидальной функцией длины внешнего резонатора S_0S_2 . При нарушении условия (50), а именно, если

$$\frac{|r_2| (1 - |r_0|^2) L_{02}}{|r_0| L_{10}} > 1 , \quad (51)$$

решение дисперсионного уравнения (30) становится неоднозначным и при изменении длины L_{02} внешнего резонатора в поведении частоты могут наблюдаться разрывы, скачки и другие нелинейные эффекты [89].

Эту ситуацию демонстрируют результаты численного решения трансцендентного уравнения (49), которое для удобства расчетов можно представить в виде:

$$a \cdot x - b \cdot \sin(x+c) = 0 , \quad (52)$$

где x пропорционально сдвигу частоты $(k' - k)$, а и b – определяются параметрами трехзеркального резонатора, а c пропорционально L_{02} .

Результаты численных расчетов, выполненные с помощью компьютерной программы MATLAB, представлены на рис.8 и рис.9.

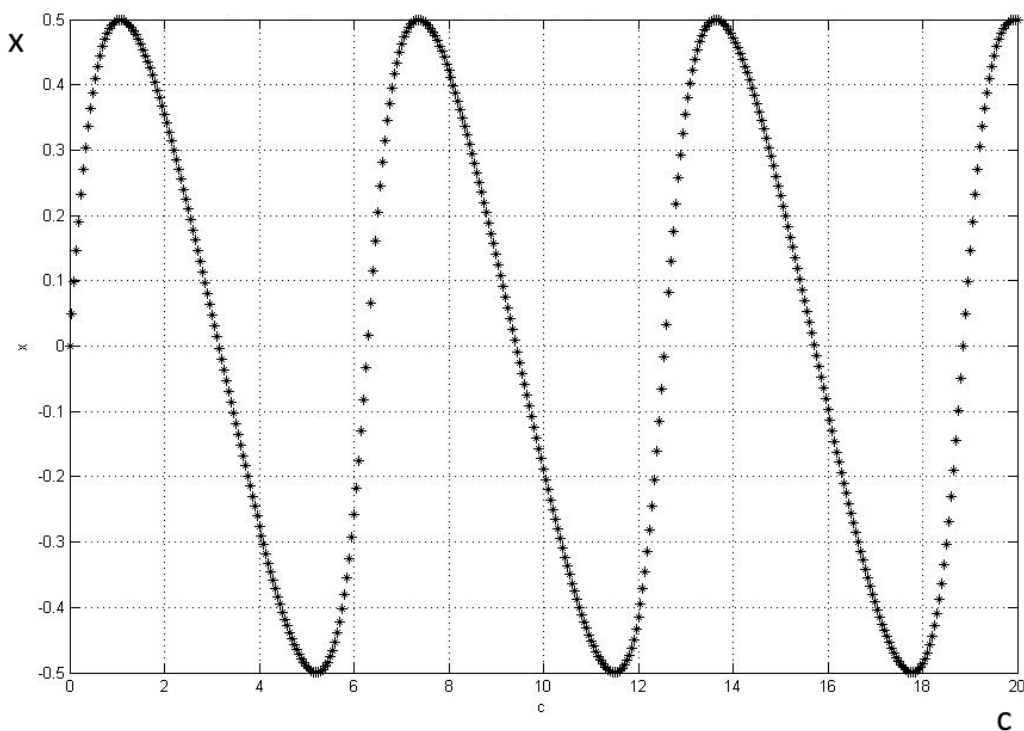


Рис.8. Решение уравнения $0=b \cdot \sin(x+c)-a \cdot x$, где $b=1$, $a=2$, c -меняется от 0 до 20, с шагом 0,05

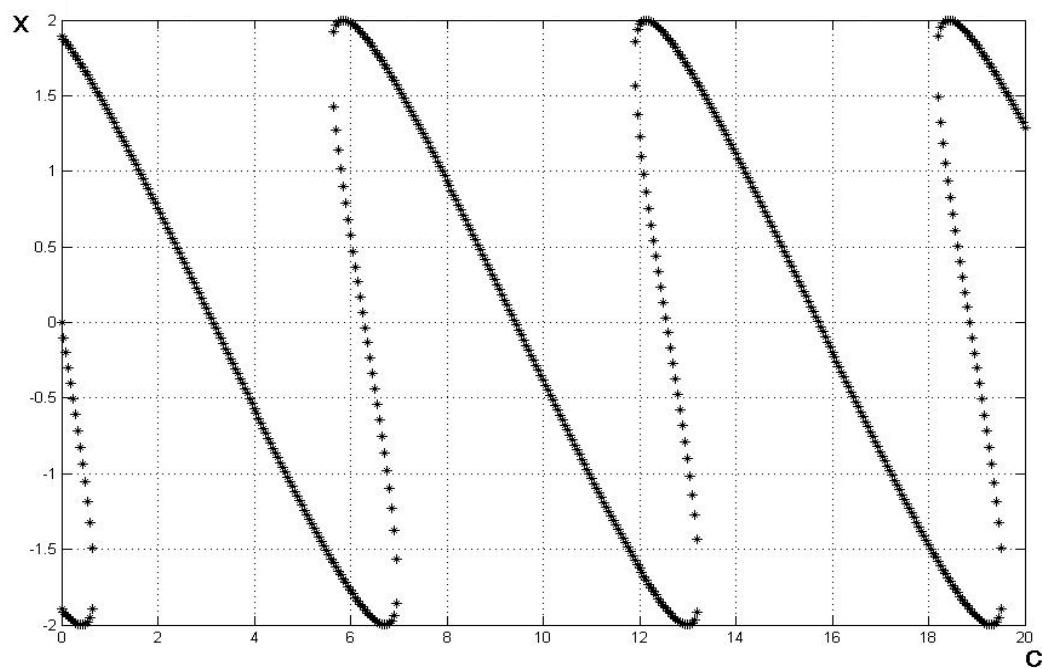


Рис.9. Решение уравнения $0=b \cdot \sin(x+c)-a \cdot x$, где $b=1$, $a=0,5$, c -меняется от 0 до 20, с шагом 0,05

Видно, что при величине параметров $b=1$, $a=2$ условие (50) еще не нарушается и поведение частоты близко к синусоидальной зависимости (рис.8). Увеличение связи резонаторов за счет возрастания $|r_2|$, а также увеличение длины внешнего резонатора L_{02} приводят к ситуации, описываемой условием (51), параметры $b=1$, $a=0,5$ (рис.9). Здесь наблюдаются области, в которых сдвиг частоты χ может принимать два или три значения. Поведение частоты в этих областях становится нестабильным, точность интерферометрических измерений на больших базах может значительно ухудшаться.

2.4. Исследование трехзеркального лазерного интерферометра с термоуправляемым резонатором

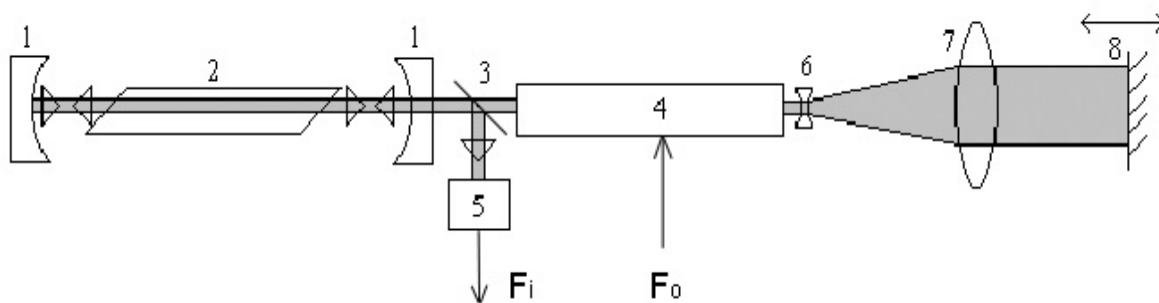


Рис. 10. Схема интерферометра. 1,2 - лазер, 3 - светоделительная пластинка, 4 - фазовый модулятор, 5 - фотоприемник, 6,7 - согласующий телескоп, 8 - измерительное зеркало

Трехзеркальный лазерный измеритель перемещений и деформаций представляет собой интерферометрический прибор, работающий на принципе оптической обратной связи (рис. 10) при суперпозиции двух независимых модуляционных процессов. Один из них осуществляется с помощью электрооптического модулятора, частота модуляции задается пилообразным опорным напряжением (30 кГц) от внешнего источника, это позволяет регистрировать интерференционный сигнал и в отсутствие деформационных колебаний. Второй модуляционный процесс обусловлен

изменениями длины измерительного плеча интерферометра в соответствии с деформационными колебаниями.

Одновременная генерация на связанных переходах $3s-2p$ и $3s-3p$ в гелий-неоновом лазере определенным образом сказывается как на работу самого лазера, так и на условия его применения в различных измерительных системах. Свои особенности режим двухволновой генерации привносит и в интерферометрические измерения длин, перемещений и деформаций. Наличие в выходном излучении лазера одновременно двух длин волн $0,63$ мкм и $3,39$ мкм позволяет использовать такие приборы для разработки новых схем интерферометров, обеспечивающих разрешение неоднозначности при измерении перемещений, значительно превышающих длину волны света. С применением двухволнового лазера возможно создание дисперсионного интерферометра-рефрактометра, осуществляющего коррекцию оптической длины при изменении показателя преломления среды на протяженных измерительных трассах.

Эксперименты проводились с He-Ne газоразрядными трубками с внутренними зеркалами и длиной резонатора 23 см и 30 см, обеспечивающими двух- и трехчастотный режим генерации на длине волны $0,63$ мкм и одночастотный режим – на длине волны $3,39$ мкм. Активный элемент лазера представляет собой наполненную смесью *He* и *Ne* трубку из термостойкого стекла, в которой имеются электроды, служащие для поддержания газового разряда. Возбуждение атомов происходит в результате столкновения их с электронами газоразрядной плазмы. Разряд на постоянном токе зажигается в смеси газов, содержащей гелий при давлении около 1 мм рт. ст. и неон при давлении около $0,1$ мм рт. ст. Обладающие достаточной энергией электроны разряда переводят атомы гелия в целый ряд возбуждённых состояний. В процессе каскадных переходов возбуждённых атомов вниз большая часть их накапливается на долгоживущих уровнях 2^3S и 2^1S , времена жизни которых равны 10^{-4} с и $5 \cdot 10^{-6}$ с соответственно. Поскольку эти метастабильные уровни близки по энергии к уровням $2s$ и $3s$

неона, то может происходить возбуждение атомов неона в указанных состояниях. Переход атомов Ne в состояние $2s$ и $3s$ осуществляется при столкновениях возбуждённых атомов гелия и атомов неона, находящихся в основном состоянии, в результате чего атомы обмениваются энергиями. Небольшая разность энергии переходит в кинетическую энергию после столкновения. Таков основной механизм накачки $He-Ne$ лазера, работающего на двух связанных переходах $3s-3p$ 0,63 мкм и $3s-2p$ 3,39 мкм.

Вследствие нелинейных эффектов насыщения активной среды частота излучения лазера на длине волны $\lambda_1 = 0,63$ мкм будет зависеть от мощности и частоты излучения $\lambda_2 = 3,39$ мкм при их одновременной генерации.

Рассмотрим $He-Ne$ лазер генерирующий на двух связанных переходах λ_1 и λ_2 , причем на длине волны λ_1 лазер работает в режиме возбуждения трех оптических частот (продольных типов колебаний), а на длине волны λ_2 – в одночастотном режиме. Пусть для исходного значения длины резонатора положение оптических частот относительно доплеровского контура усиления активной среды занимает некоторое начальное положение. Генерируемые частоты будут смещаться при изменении длины резонатора l следующим образом:

$$\Delta \nu_{1,2} = -\frac{c}{\lambda_{1,2} l} \Delta l \quad (53)$$

где $\Delta \nu_1$ и $\Delta \nu_2$ – смещение частот на переходах λ_1 и λ_2 ,

Δl – изменение длины резонатора, c – скорость света.

Таким образом, одному и тому же Δl соответствует примерно в 5 раз меньшее смещение частоты на переходе $\lambda_2 = 3,39$ мкм, чем на $\lambda_1 = 0,63$ мкм:

$$\Delta \nu_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \Delta \nu_1, \quad (54)$$

хотя относительное смещение частот в обоих случаях одинаково. Аналогичным образом соотносятся и ширины доплеровских контуров усиления $\Delta \nu_{D1}$ и $\Delta \nu_{D2}$ на переходах λ_1 и λ_2 .

Рассмотрим методику и результаты проведенных экспериментов. Для отслеживания температуры корпуса лазера использовался прецизионный многоканальный измеритель температуры МИТ-8 с разрешением 0,001 К в диапазоне 273-378 К [91]. Датчики температуры располагались вдоль корпуса лазера. Излучение поступало на фотоприемник, и сигнал с него регистрировался с помощью персонального компьютера.

На рисунке 11 сверху показано изменение температуры корпуса лазера сразу после включения. По оси X отложено время в секундах, по оси Y – температура, измеренная в градусах Цельсия. Датчики располагались вдоль основного металлического корпуса лазера, находящегося внутри стальной трубы. На нижнем графике показано изменение интенсивности излучения. Кривая имеет периодическую структуру. Одно колебание соответствует изменению длины резонатора на величину $\lambda_2 / 2$, где λ_2 – длина волны 3,39 мкм. Интенсивность излучения $P_{\text{лазера}}$ меняется в пределах от 60% (минимальная интенсивность) до максимального значения интенсивности 100% относительно нуля. Колебания мощности излучения лазера при прогреве его резонатора имеют характерную квазипериодическую форму с двумя выделенными периодами $\lambda_1/2$ и $\lambda_2 / 2$.

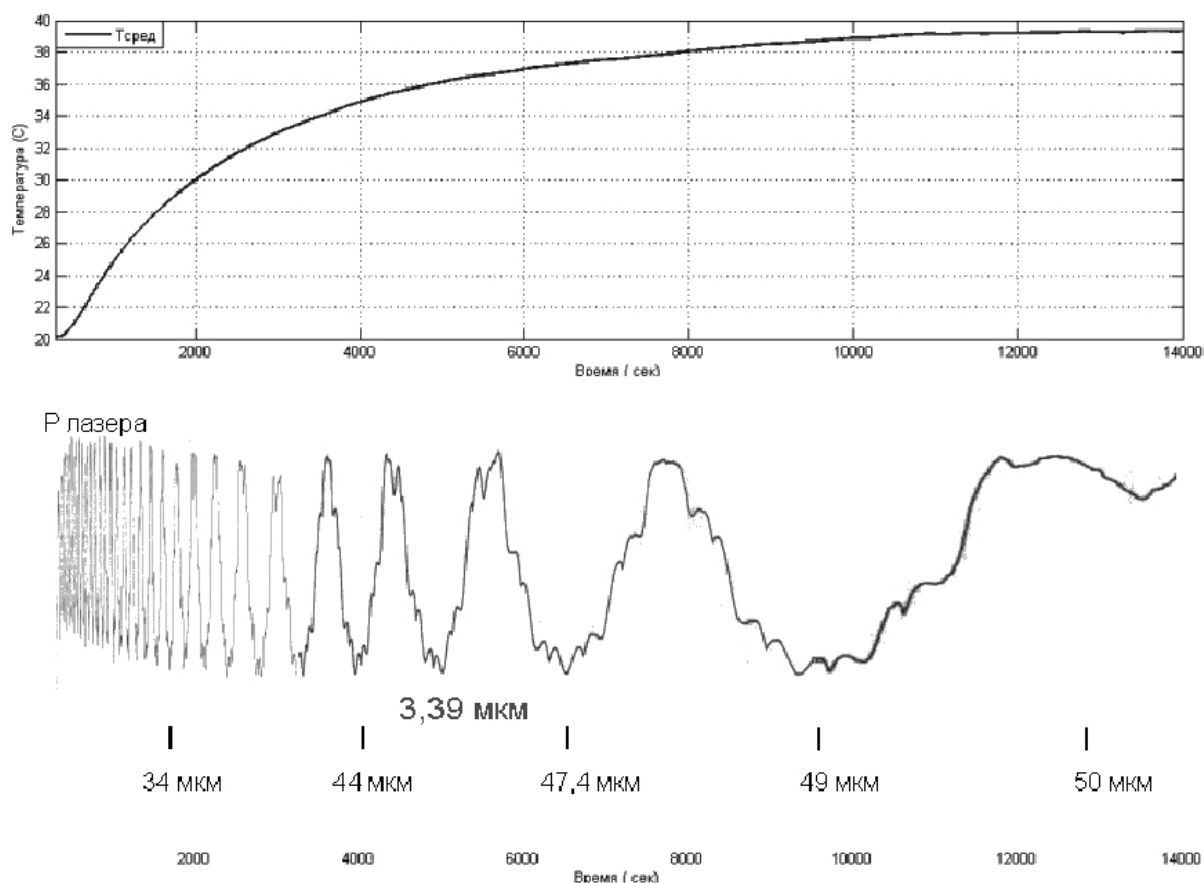


Рис. 11. Зависимость мощности излучения двухволнового лазера от температуры.

На рисунке 12 показано изменение интенсивности излучения лазера, работающего в режиме одноволновой генерации (нижняя кривая 1) и – в режиме двухволновой генерации (верхняя кривая 2). В двухволновом режиме на колебания интенсивности, связанные с длиной волны 3,39 мкм, накладываются колебания, соответствующие генерации на длине волны 0,63 мкм. Поскольку отношение λ_2 к λ_1 , примерно равно 5,36, не является целым числом, зависимость интенсивности от длины резонатора является сложной квазипериодической функцией. Тем самым образуется последовательность экстремумов - своеобразная нониусная шкала, которую можно использовать в прецизионной интерферометрии. На рисунке обозначено количество периодов n с момента включения лазера

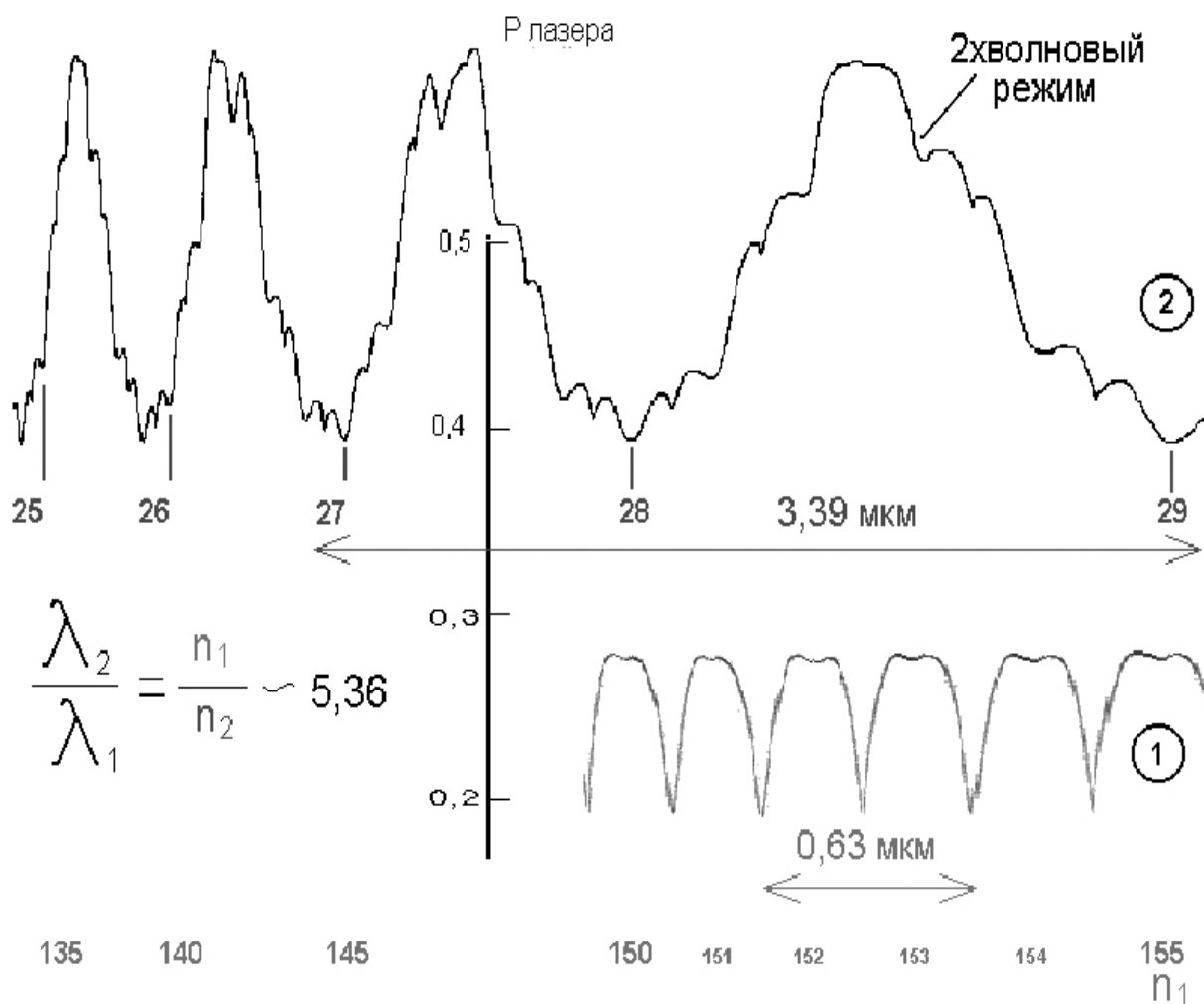


Рис. 12. Изменение интенсивности лазера в одноволновом (1) и двухволновом (2) режиме работы.

для генерации 3,39 мкм (25, 26, 27, 28, 29) и для генерации 0,63 мкм (135, 140, 145, 150, 151, 152, 153, 154, 155).

Двухволновый лазер, рассмотренный выше использовался при построении интерферометрических измерителей деформаций. На рисунке 13 показан характерные примеры работы длительностью 2 минуты для двух интерферометров-деформографов: первый с длиной базы 300 м (пучок излучения защищен подземным лучеводом) и второй – 66 м, пучок распространяется в открытой атмосфере.

При работе трехзеркального лазерного интерферометра в двухволновом режиме обнаружено наличие зон нестабильной генерации. На

рисунке 14 показана зона нестабильной работы для 66-метрового интерферометра (см. нижний график). При перестройке длины резонатора, вызванной нагревом лазера, такие зоны нестабильности появляются периодически, что и показано на рисунке 14. Здесь по оси X отложено время, по оси Y: для верхнего графика показана мощность излучения (соответствует изменению интенсивности излучения лазера 2 на рис. 12) и для нижнего графика показана деформация (сигнал на выходе работающего интерферометра-деформографа). Как видно из рисунка зоны нестабильной работы трехзеркального деформографа периодически повторяются, чередуясь с режимом стабильной работы. Это обстоятельство можно обходить, подстраивая частоту лазера т.е. длину резонатора в диапазоне 316 нм., что соответствует ширине зоны стабильной работы.

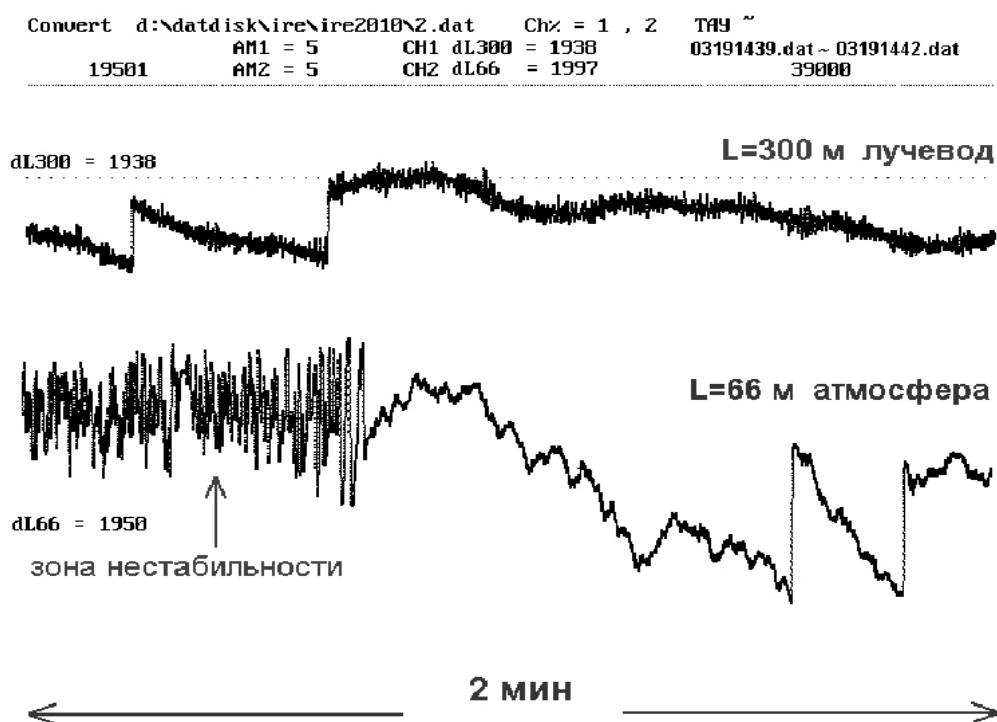


Рис 13. В зоне нестабильности регистрируемый сигнал подвергается случайным хаотическим флуктуациям.

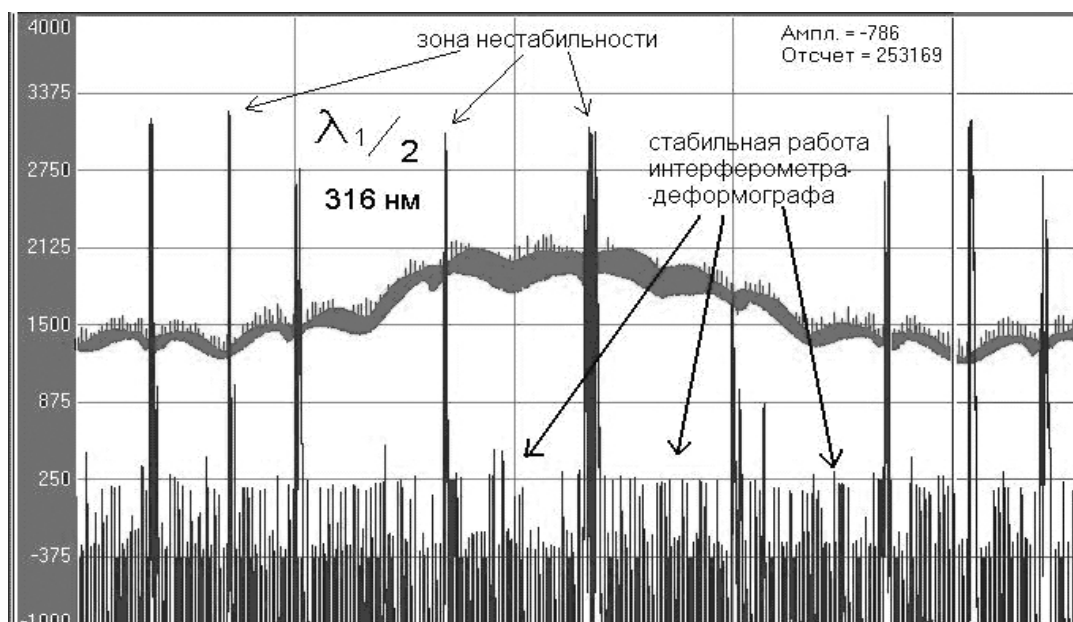


Рис 14. При оптимальной настройке резонатора лазера может быть обеспечена стабильная работа трехзеркального лазерного интерферометра в двухволновом режиме.

Получены и проанализированы интегральные уравнения, описывающие электромагнитное поле в трехзеркальном резонаторе с цилиндрическими зеркалами. Исследованы случаи, когда промежуточное зеркало является плоским; резонаторы не согласованы. Выполнена проверка полученных результатов путем численного моделирования поведения собственных частот для некоторых простейших случаев трехзеркального лазерного резонатора. Показано, что при увеличении связи лазера с внешней нагрузкой и увеличении длины внешнего резонатора наблюдаются области, в которых сдвиг частоты может принимать два или три значения. Поведение частоты в этих областях становится нестабильным, точность интерферометрических измерений на больших базах значительно ухудшается.

Проанализированы особенности работы двухволнового He-Ne лазера в режиме генерации на связанных переходах 3,29 мкм и 0,63 мкм. В трехзеркальном лазерном интерферометре, в двухволновом режиме генерации, обнаружено наличие зон нестабильной работы. Определены

условия оптимальной настройки лазера для обеспечения стабильной работы трехзеркального лазерного интерферометра.

Для исследованных лазерных резонаторов получены оценки температурных коэффициентов расширения и постоянные времени, характеризующие тепловую инерционность лазерных резонаторов.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для усовершенствования методов измерений и создания новых приборов. Возможна разработка способов уменьшения паразитного влияния отраженного излучения от устанавливаемых приборов на пути пучка и коррекции частоты излучения лазера при использовании управляемого подвижного зеркала. Полученные результаты позволят повысить стабильность работы и точность трехзеркального интерферометра-деформографа, в котором используется обратное отражение для регистрации перемещений.

Глава 3. Разработка методов регистрации и автоматизированного анализа данных лазерного интерферометра-деформографа

3.1 Система регистрации гетеродинного типа

Известен целый ряд устройств гетеродинных интерферометров, использующих либо два лазера, сдвинутых друг относительно друга по частоте на небольшую фиксированную величину, либо излучение одного лазера, промодулированное однополосным акустооптическим или специальным электрооптическим модулятором. Иногда для этой же цели используют двухчастотные Зееман - лазеры. Принцип работы таких интерферометров заключается в следующем. Лазерный пучок основной частоты направляется, например, в измерительное плечо интерферометра, а сдвинутый по частоте – в опорное плечо. При последующем сложении интерферирующих пучков на фотоприемнике выделяется информационный сигнал на промежуточной (радио) частоте, фаза которого однозначно связана с оптической фазой пучка в измерительном плече. Этот сигнал вместе с опорным сигналом промежуточной частоты подается на фазометр, который регистрирует изменения длины плеча интерферометра.

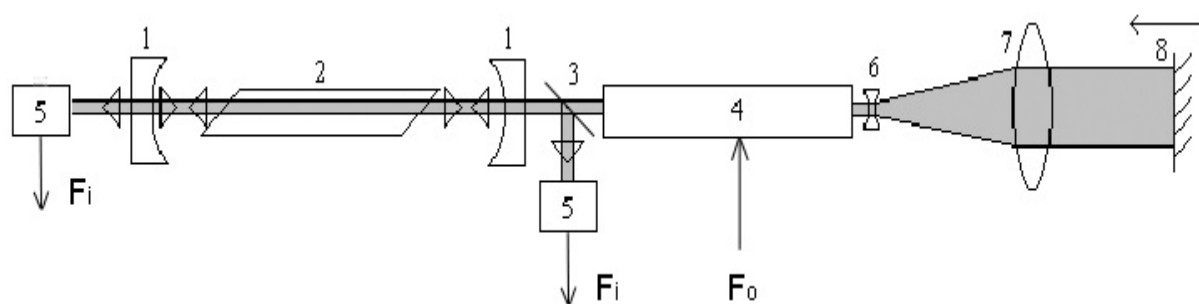


Рис 15. Блок схема трехзеркального лазерного интерферометра.

Предлагаемая система работает по схеме трехзеркального лазерного интерферометра (см. рис. 15) и состоит из лазера (элементы 1,2), светоделительной пластинки 3, фазового модулятора 4, введенного между основным резонатором и третьим измерительным зеркалом, фотоприемника

5, согласующего телескопа 6,7, измерительного зеркала 8. Устройство работает следующим образом. От эталонного генератора на фазовый модулятор подается пилообразное напряжение с частотой f_0 и амплитудой, которая обеспечивает максимальный сдвиг фазы передаваемого луча на 360° , т.е. ровно одна длина волны. Известно, что такая фазовая модуляция эквивалентна сдвигу оптической частоты лазерного луча на величину f_0 , то есть здесь пилообразный генератор и фазовый модулятор выполняют однополосную модуляцию света. Когда это излучение суммируется с излучением основной частоты, сигнал с разностной частотой f_0 выделяется на фотоприемнике. Затем сигнал направляется усилителем - ограничителем на один из входов (например, сумматор). Другой (вычитающий) вход счетчика, который принимает сигнал опорной частоты от генератора f_0 . Разница, регистрируемая непрерывно реверсивным счетчиком, является результатом измерения перемещений интерференционной картины в периодах (то есть импульс на выходе счетчика соответствует изменению длины плеча L на $\lambda/2$). Ограничительный усилитель используется для «фильтрации» амплитудного искажения сигнала на выходе фотодетектора в случае помех в интерферометре (турбулентность в измерительном плече, нестабильность оптических элементов, лазерная нестабильность и т. д.). Цифровой сигнал от измерителя преобразуется ЦАП в аналоговый сигнал, который, в свою очередь, записывается внешними аналоговыми устройствами записи. В нашем случае используется ПК с АЦП. Пример такого сигнала представлен на рисунке 16.

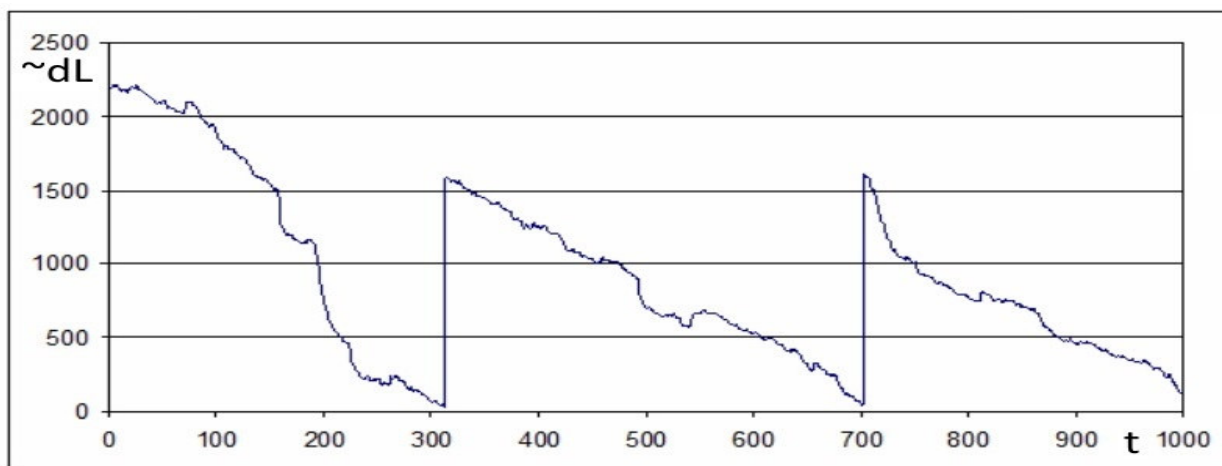


Рис 16. Пример записи интерферометра-деформографа.

На записях видны разрывы, связанные с переключением счетчика в среднюю точку при достижении выбранного предела. Для дальнейшей обработки данных требуется удалить эти перебросы – разрывы записи.

3.2 Разработка и апробация методов линеаризации данных лазерного интерферометра-деформографа.

Лазерные интерферометрические измерительные системы в настоящее время являются наиболее точным средством регистрации сейсмических, геодинамических и других геофизических процессов деформации. Увеличение относительного разрешения деформографов интерферометров достигается путем разработки и модернизации не только электронных систем записи сигналов, но и методов анализа и обработки записанных данных. Например, чтобы устранить возникающие пропуски записи, применяется аппаратный программный метод для объединения данных, а также численное устранение пропусков при компьютерной обработке зарегистрированного исходного сигнала. Используемая здесь математическая модель разрыва обычно выражается функцией $f(t) = \text{SIGN}(t)$, т.е. он имеет форму прямоугольного шага [92]. Мы разработали и применили ряд оригинальных методов линеаризации полученных данных.

Рассмотрим два когерентных световых пучка с интенсивностями I_1 и I_2 , образующими интерференционную картину или, что эквивалентно, интерферограмму в плоскости фотоприемника. Интенсивность света I

означает усредненное по времени количество энергии, которое пересекает единицу площади, перпендикулярную направлению потока энергии в единицу времени [93]. Согласно классической теории интерференции, распределение интенсивности I интерферограммы, образованной этими световыми лучами, можно записать в виде суммы трех слагаемых [93]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta(t), \quad (55)$$

где δ – изменяющаяся во времени разность фаз интерферирующих лучей. Выражению (55) можно придать простой геометрический смысл, если представить его в виде двойной суммы двух слагаемых:

$$I = 2\left(\frac{I_1 + I_2}{2} + \sqrt{I_1 I_2} \cos \delta(t)\right) \quad (56)$$

Первый член этой суммы – среднее арифметическое, а амплитуда постоянной времени второго – среднее геометрическое (пропорциональное среднее) двух величин I_1 и I_2 . Размер второго члена изменяется синусоидально в зависимости от δ . и, как правило, нелинейная функция, когда фазы $\delta(t)$ интегрирующие лучи случайным образом меняются со временем. Если один из интерферирующих лучей проходит дополнительный путь L в плече интерферометра, разность фаз будет следующей:

$$\delta(t) = \omega L(t) / c = 2\pi L(t) / \lambda, \quad (57)$$

где ω – круговая частота, λ – длина волны, c – скорость света. Поэтому задача интерферометрического эксперимента состоит в том, чтобы решить нелинейное уравнение, которое можно получить, подставив (57) в выражение (56):

$$I(t) = 2A + 2B \cos(2\pi L(t) / \lambda), \quad (58)$$

где $I(t)$ – измеренная фотоприемником интенсивность интерферограммы, а постоянные коэффициенты A и B – указанные выше среднеарифметическое и среднегеометрическое значения интенсивностей интерферирующих пучков.

На верхнем рисунке 17а показан исходный интерференционный сигнал $I(t)$, зарегистрированный фотоприемником на выходе 100-метрового интерферометра с на испытательном полигоне ФИРЭ РАН. Коэффициенты A и B соответствуют средней интенсивности и контрасту интерферограммы и являются параметрами уравнения (58). На рисунке 17б ниже показан результат численного моделирования (58), который дает желаемую зависимость $L(t)$. На длине волны лазера $\lambda = 633$ нм дискретность при расчете значения $L(t)$ составляет 0,05 нм. Временная дискриминация квантования сигнала для данного примера составляет 1 мс.

Система регистрации другого принципа генерирует аналоговый сигнал в пределах (в диапазоне) от U_{\min} до U_{\max} , пропорциональный деформации земной поверхности. Когда диапазон достигнут, механизм системы регистрации интерферометра автоматически переключает аналоговый сигнал на среднее значение. Амплитуда скачка, появляющаяся в записи, кратна $\lambda/2$, где λ - длина волны лазерного излучения. Оцифровывая выходной сигнал лазерного деформографа, формируют ряд целых чисел, отражающих временную зависимость деформаций земной поверхности. Для устранения разрывов интерферометрической записи при компьютерной обработке зарегистрированного исходного сигнала используются численные методы. Специальный алгоритм и программа для устранения скачка, который происходит в интерферометрической записи представлены:

$$f(t) = D \mp e^{\frac{-(ex_nul+t)}{\tau}}, \quad (59)$$

где: D – величина переброса, ex_nul – переменная, дающая $f(0) = 0$, τ - постоянная времени экспоненты, определяемая параметрами системы интерферометрической регистрации.

Разработанный алгоритм и программа проверяют числовой поток, поступающий от лазерного деформографа, на наличие переключения и, в случае обнаружения, вычитают экспоненциальную функцию $f(t)$ из входящего потока во время процесса перехода. С развитой экспоненциальной

аппроксимацией разрыва по сравнению с [92] была достигнута более высокая точность линейризации.

На рис. 18а показан характерный вид записанных данных с использованием деформографа интерферометра. 12 мая 2015 года в Непале было зарегистрировано землетрясение устройством, установленным на полигоне ФИРЭ РАН. На рис. 18б показаны результаты обработки данных программой удаления разрывов.

С помощью разработанных программ линейризации были обработаны данные лазерного деформографа длиной 100 м на полигоне ИРЭ РАН во Фрязино, а также на других деформографах интерферометрах с измерительной базой от 3 м до 300 м. Разделы 3, 4 содержат примеры записанных данных и сравнительный анализ результатов их обработки. Предельная минимальная амплитуда сигнала составляет 0,1 нм, что соответствует величине относительных деформаций 10^{-12} при длине измерительного плеча 100 метров.

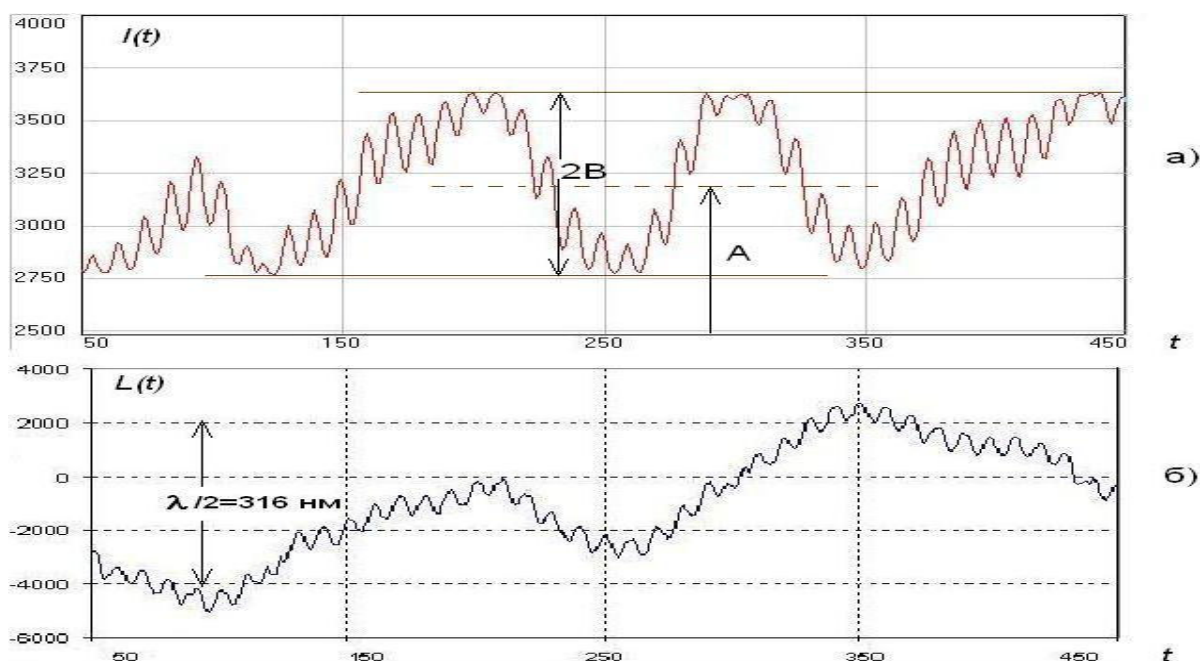


Рис 17. На верхнем рисунке а) показан исходный интерференционный сигнал $I(t)$, на нижнем рисунке б) приведен результат численного моделирования, дающего искомую зависимость $L(t)$.

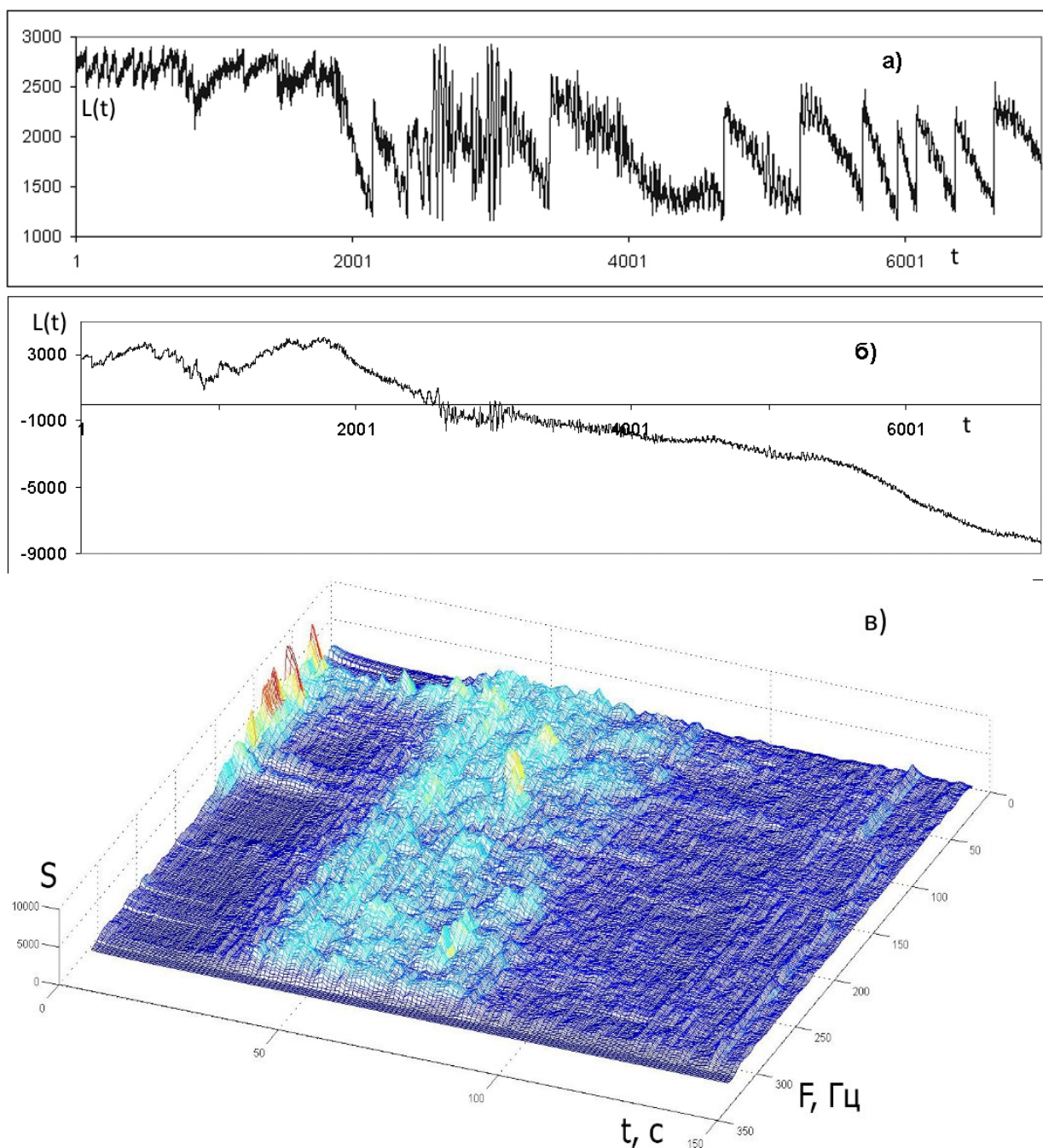


Рис 18. На верхнем рисунке а) показан характерный вид регистрируемых данных с помощью интерферометра-деформографа. Зафиксировано землетрясение в Непале 12 мая 2015г. магнитудой M_w 7,3. На нижнем рисунке б) приведен результат обработки данных. (Длительность записи 1 час) в) спектрально-временная диаграмма сигнала.

3.3 Описание работы программы сшивки данных

Данные, получаемые с лазерных деформографов посредством оцифровки выходного сигнала, являются массивом целых чисел в диапазоне от 0 до 2^{12} , отражающих временную зависимость деформации земной поверхности. Частота дискретизации задается программно. При достижении

сигналом уровня, соответствующего границам диапазона $0-2^{12}$ срабатывает механизм переключения системы регистрации интерферометра в среднюю точку (см. рис. 19). Задачей ставится удаление возникающего при этом скачка с одновременным увеличением разрядности данных. Предложенная программа исследует поток чисел на предмет наличия переключения. Поиск ведется по двум критериям: превышение заданного порога разницы между соседними точками и превышение среднего значения по левую и правую стороны от точки срабатывания первого условия с учетом производных.

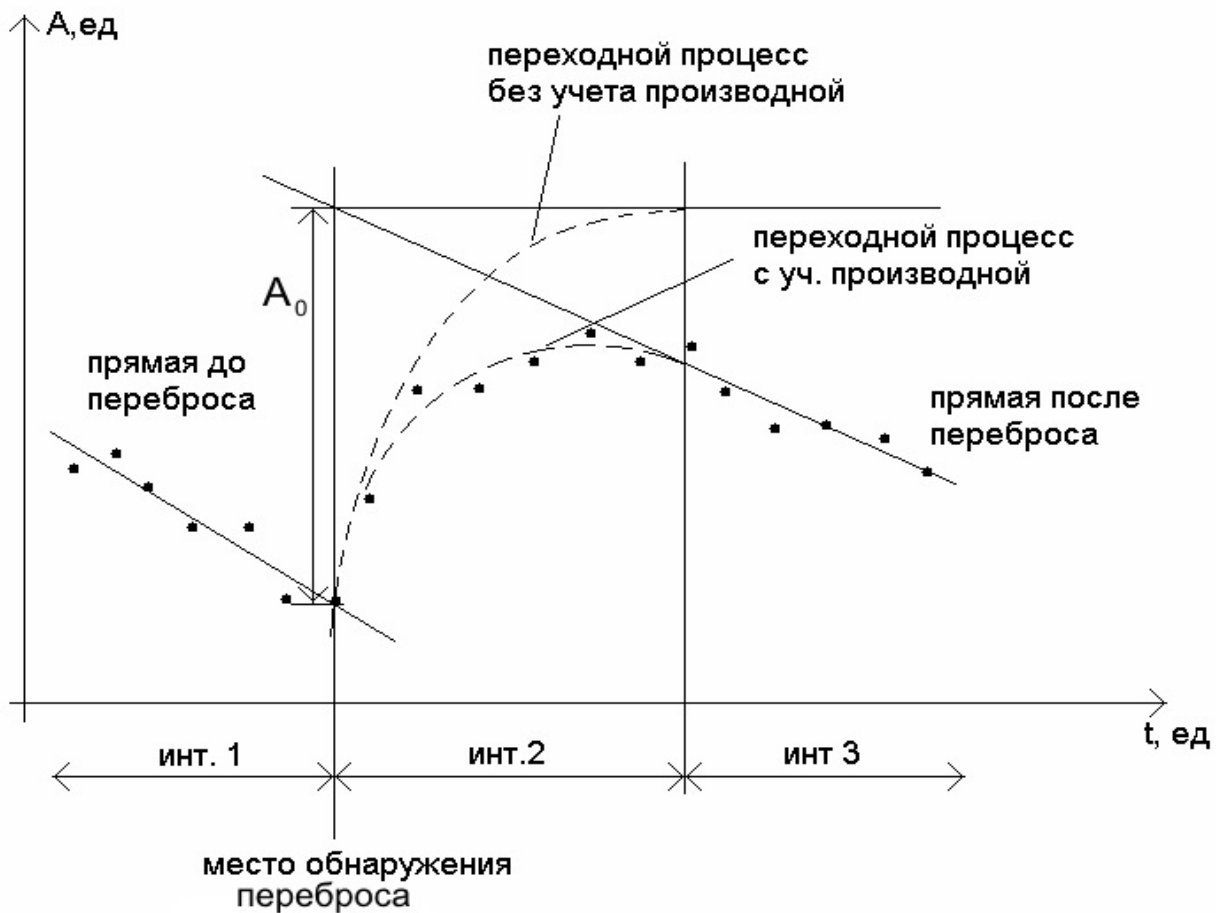


Рис 19. Принцип работы программы сшивки данных (поступающие данные).

После обнаружения переключения в среднюю точку идет коррекция данных по следующему алгоритму. Часть данных, в непосредственной близости от переброса разбиваются на три интервала: первый – до момента переключения, второй – включает в себя переходной процесс и третий после завершения перехода, как показано на рисунке.

Величины этих интервалов зависят от входных параметров. В первом и третьем участках строятся прямые методом наименьших квадратов. Величина переключения определяется как разность A_0 между этими прямыми в точке начала переброса. В переходной области данные корректируются путем вычитания функции:

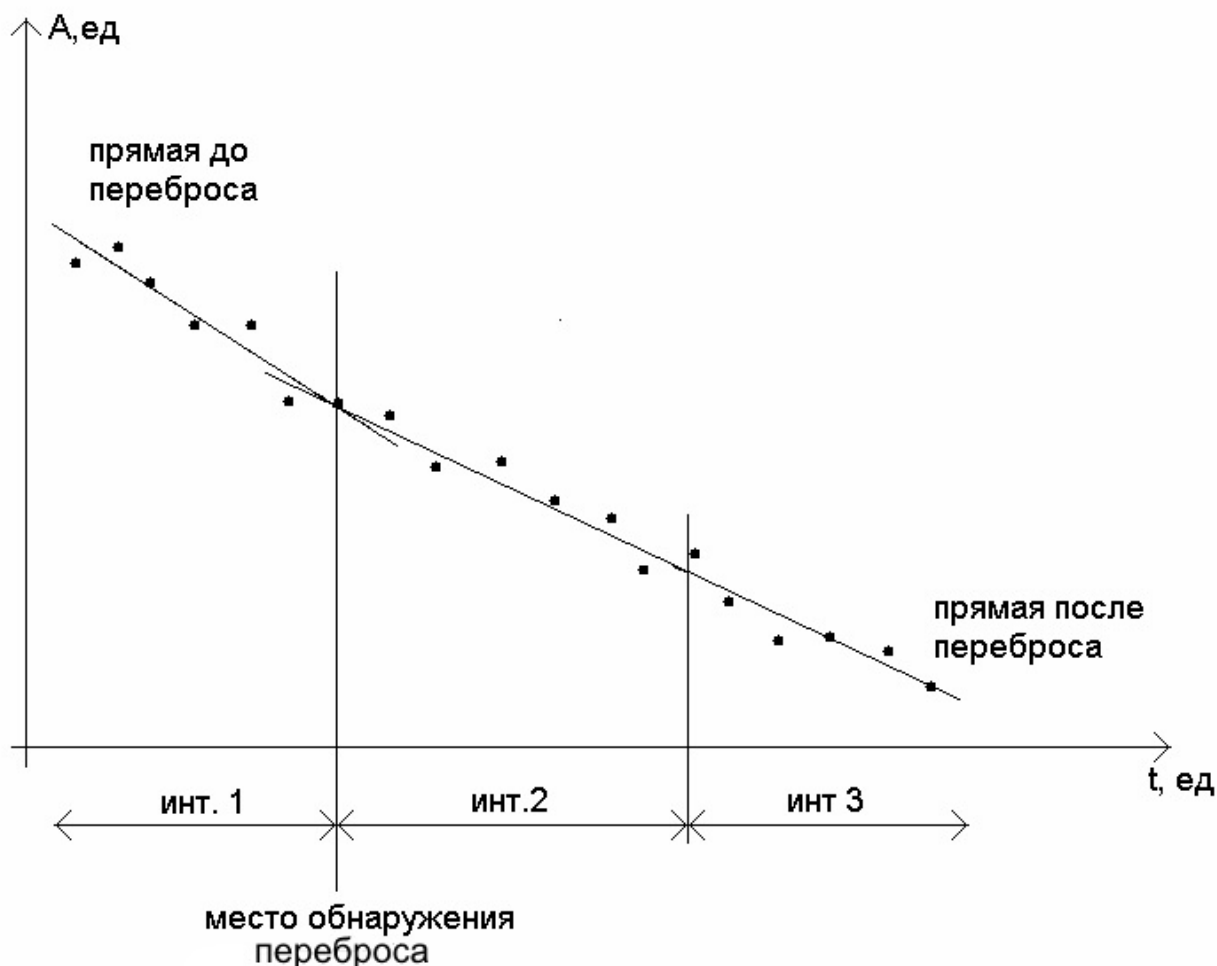


Рис 20. Принцип работы программы сшивки данных (результат обработки).

$$f(t) = skachok \mp e^{\frac{-(exp_nul+t)}{tau}} - g(t)$$

где

$skachok$ – величина переброса

exp_nul – переменная, дающая $f(0)=0$

tau - постоянная времени экспоненты, задается оператором

$g(t)$ – функция, учитывающая влияние производной

Последующие данные корректируются на величину переброса.

Ниже приведен результат такой обработки. На рисунке 21 показаны исходные данные с переключениями, на рисунке 22 представлены обработанные данные.

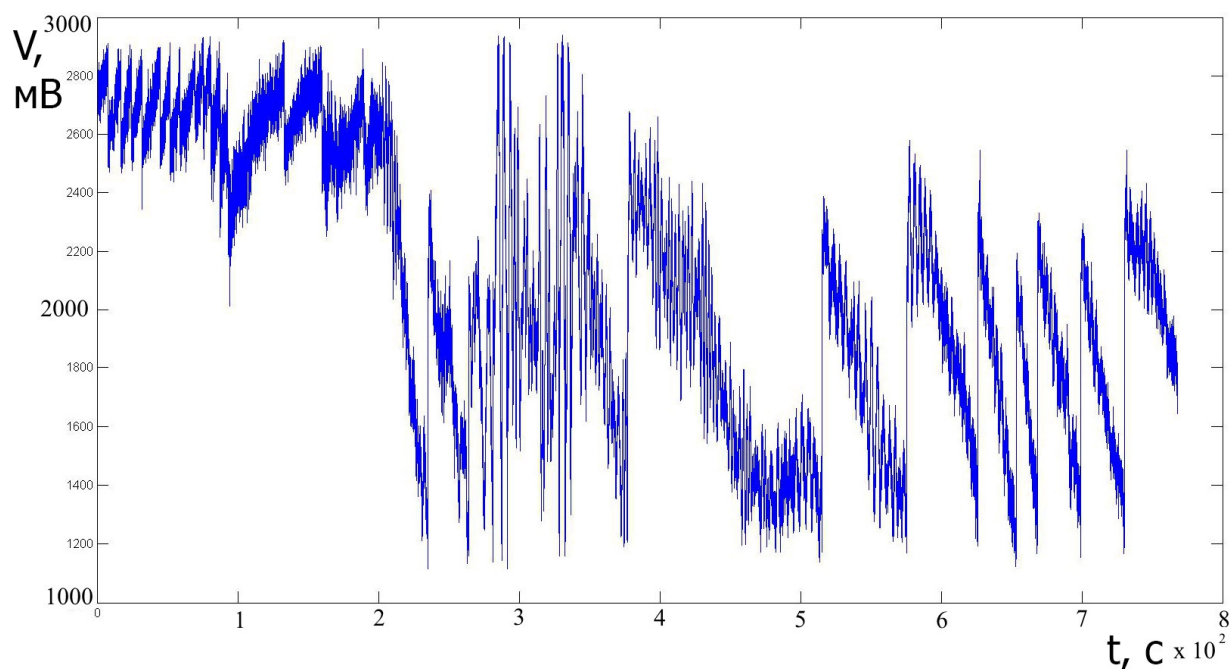


Рис 21. Показан характерный вид регистрируемых данных с помощью интерферометра-деформографа. Зафиксировано землетрясение в Непале 12 мая 2015г. магнитудой Mw 7,3.

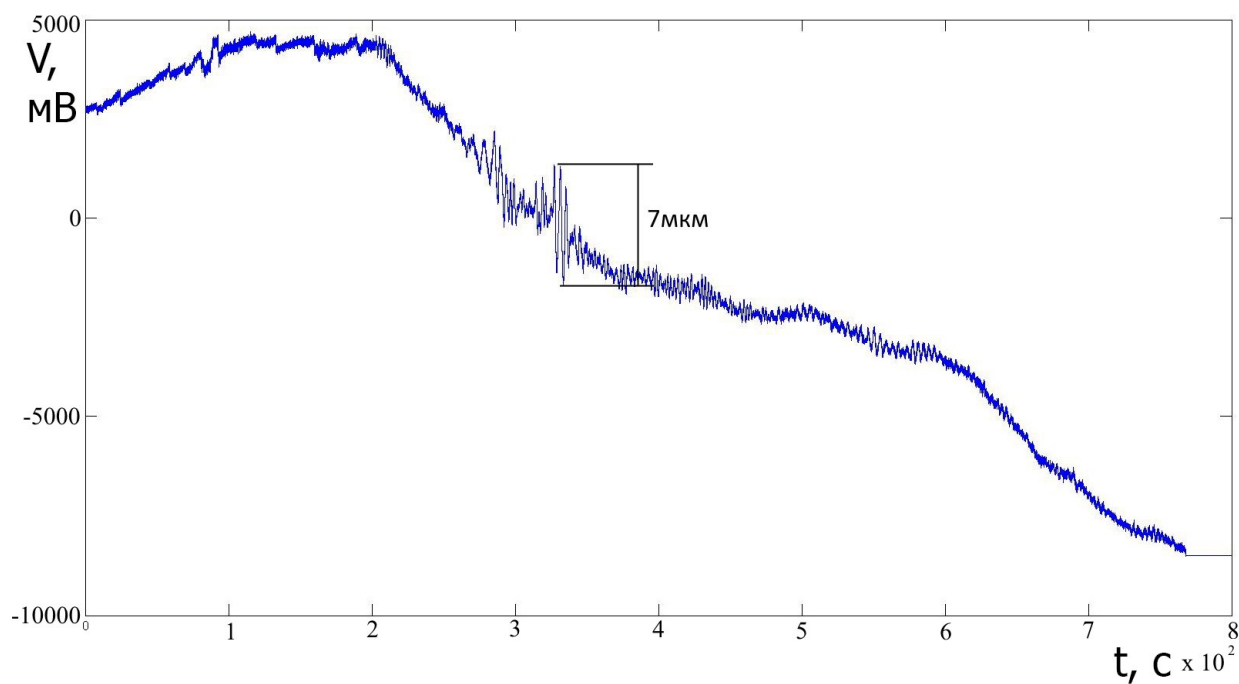


Рис 22. Результат обработки данных.

3.4 Программа спектрально-временного анализа данных лазерного деформографа.

Для обработки данных, полученных при помощи интерферометра-деформографа, используется спектрально-временной анализ.

Поток значений разбивается на интервалы произвольной длины (в примере 250 отсчетов). Далее, с применением быстрого преобразования Фурье (БПФ), поочередно вычисляются спектры этих сигналов. Для вычисления БПФ используется программа `serfft` из пакета VRN (обработка временных рядов). Полученный массив отображается в виде растрового изображения. По осям откладывается частота и время. Яркость точки зависит от величины значения и находится в промежутке от 0 до 255. Можно регулировать яркость и контрастность полученной картинке (в примере яркость $x=50$, контрастность $y=90$. Значение «яркости точки» умножается на y и прибавляется x). Насыщенным черным цветом отображены точки, значение которых превышают 255, как показано на рисунке 23.

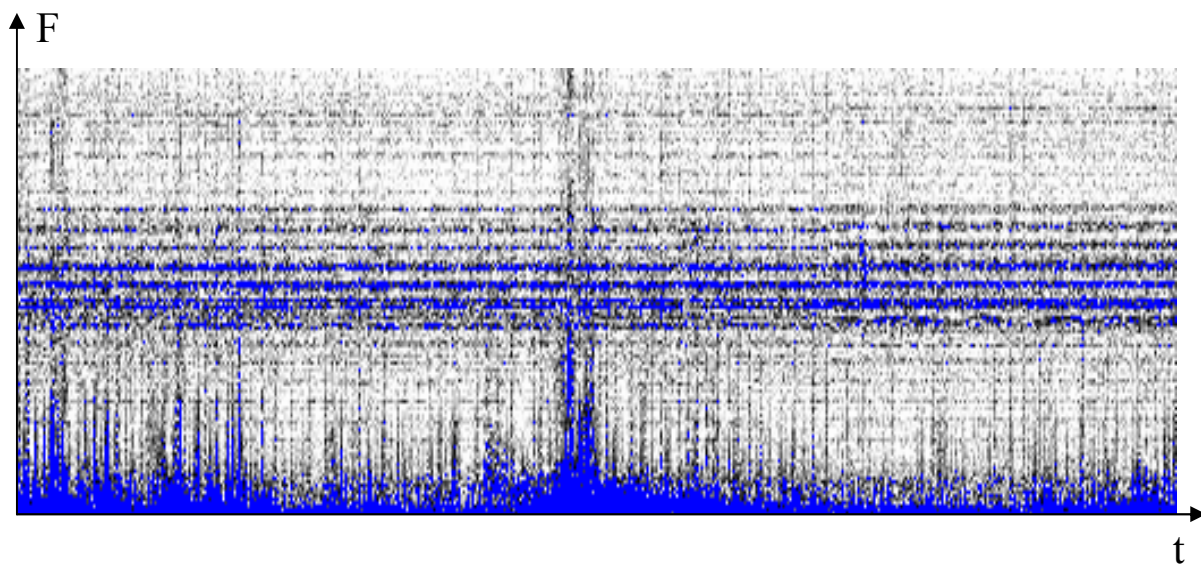


Рис 23. Спектрограмма сигнала.

3.5 Разработка методов исследования свойств наноматериалов с использованием лазерных интерферометров и компьютерной обработки данных

В настоящее время наиболее точными и эффективными средствами измерения длин и смещений наноразмерных объектов являются точные лазерные интерферометрические приборы. Промышленные образцы высокоточных интерферометров включают приборы иностранных компаний Agilent (Zigo, США) и Renishaw (Великобритания). Предельное разрешение для измерения малых длин и смещений для этих устройств составляет порядка единиц и долей нанометра. Отечественные лазерные интерферометры примерно на порядок уступают, а приборы нанометрового масштаба находятся на экспериментальной стадии [94]. На один или два порядка более точные лазерные измерители длины и смещения разрабатываются в течение нескольких лет в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. К настоящему времени были подготовлены экспериментальные образцы для интерферометров широкого диапазона с инструментальным разрешением порядка 1 пм (10^{-12} м) при величине измеряемых перемещений $\pm 10^5$ периодов интерференционной картины [95].

Увеличение относительного разрешения интерферометров достигается путем модернизации систем записи и обработки записанных сигналов и повышения стабильности лазеров, работающих с несогласованной нагрузкой.

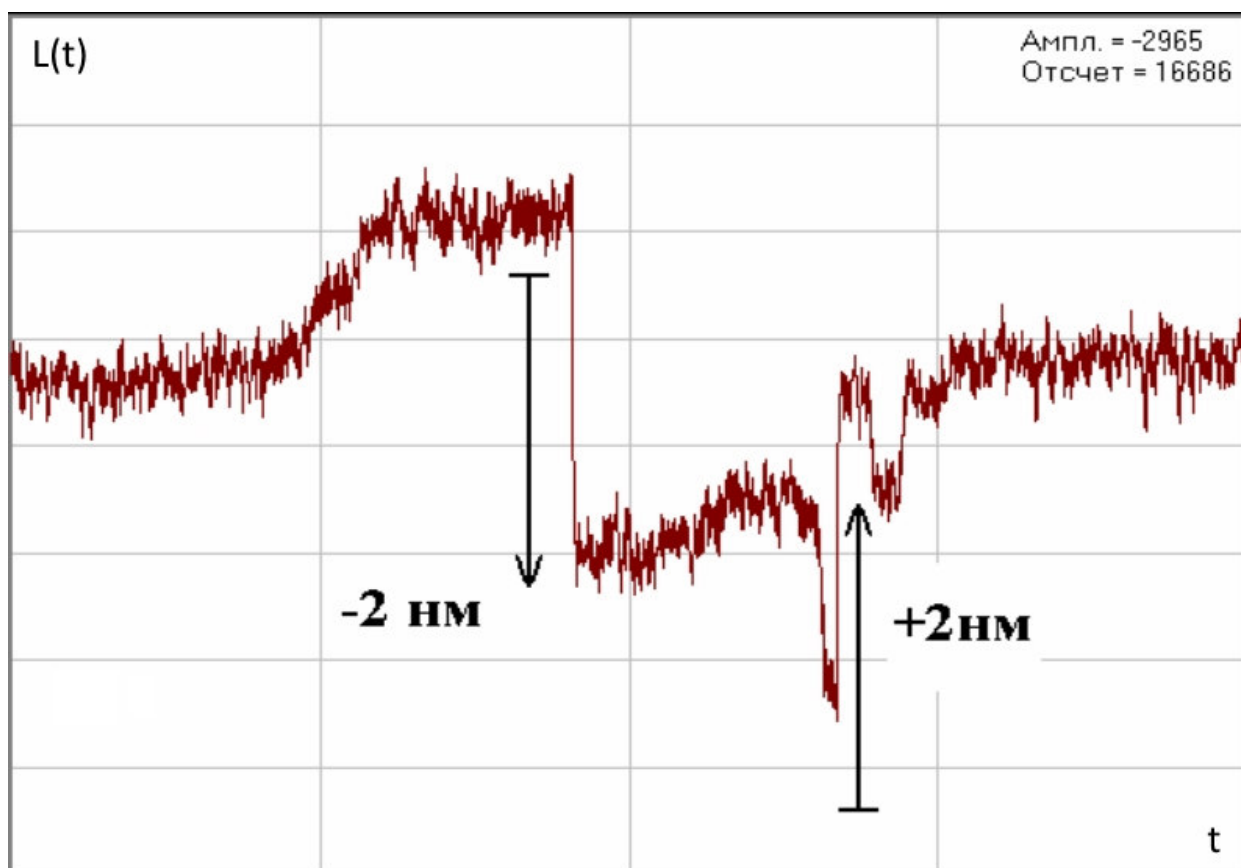


Рис. 24. Пример записи сигнала, записанного прецизионным интерферометром с кратным коэффициентом деления периода интерферограммы $N = 160$.

Продолжительность этой записи составляет около 1 минуты.

На рисунке 24 показан типичный пример записи сигнала, записанного прецизионным интерферометром [95] с кратным коэффициентом деления периода интерферограммы $N = 160$. Продолжительность этой записи составляет около 1 минуты.

Диапазон непрерывно отображаемых сдвигов объекта составляет ± 2 нм на длине волны лазера около 633 нм. Разрывы записи -2 нм и $+2$ нм соответствуют автоматическим передачам начала системы регистрации интерферометра. Данные, полученные с использованием оцифровки выходного сигнала, представляют собой последовательность целых чисел в диапазоне от 0 до 2^N , которые отражают временную зависимость смещений или деформаций исследуемого объекта. Здесь N - разрядность применяемого АЦП ($N = 12, 14, 16$), а частота дискретизации во времени задается

оператором компьютера. Когда сигнал достигает уровня, соответствующего диапазону $0-2^N$, механизм системы регистрации интерферометров автоматически переключает аналоговый сигнал в исходное положение 2^{N-1} . Амплитуда скачка в наборе данных кратна $\lambda/320$.

Для линейризации полученного набора данных используются описанные (в разделе 3.3) программы для удаления экспоненциальных скачков. Программа проверяет числовой поток, поступающий от лазерного интерферометра на наличие переключения, и, в случае обнаружения, вычитает экспоненциальную функцию $f(t)$ из входящего потока с постоянной времени τ переходного процесса.

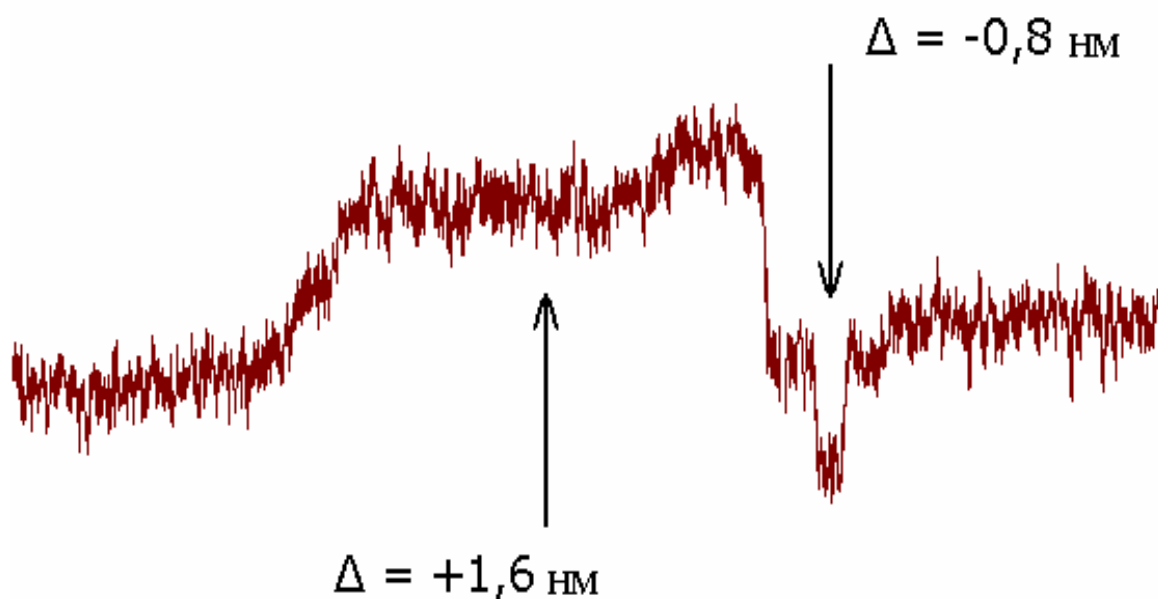


Рис. 25. Результат обработки, время записи составляет 1 минуту.

Результат обработки показан на рисунке 25, время записи составляет 1 минуту. Видна динамика относительно медленных сдвигов объекта $+1,6$ нм и кратковременной (1-2 с) деформации $-0,8$ нм. Разрешение в этой серии измерений составляет около $0,1$ нм и ограничено величиной сейсмического и вибрационного шума.

По сравнению с другими методами обработки интерферометрических данных мы можем использовать предложенную программу для увеличения линейности на один порядок и, следовательно, для повышения точности лазерного интерферометра. Использование описанного метода одновременно приводит к увеличению ширины битов полученных данных, т.е. для расширения динамического диапазона измерений. Рассмотренные лазерные интерферометрические методы могут быть использованы для определения параметров наноразмерных материалов и покрытий, например, при измерении коэффициентов упругости и теплового расширения при исследовании электрофизических и нелинейных свойств материалов, используемых в нанотехнологиях.

Глава 4 Применение интерферометра-деформографа для исследования сейсмических и геоакустических процессов.

Лазерные интерферометры-деформографы широко используются в разных частях планеты для изучения геофизических процессов [51-53,96]. Уникально широкая полоса частот лазерных интерферометров-деформографов позволяет использовать эти приборы при наблюдении большого класса геофизических процессов в энергоактивных зонах. Среди таких процессов акустические явления представляют особый интерес для исследования и разработки технологий обнаружения опасных геофизических явлений. В этом разделе мы рассмотрим использование лазерных интерферометров и деформографов для регистрации колебаний земной поверхности в сейсмической и акустической частотной области. Сопоставлены результаты полученных данных деформографа и других датчиков, установленных в энергоактивной зоне. Наблюдения проводились на подземной лучеводной линии ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН во Фрязино Московской области, в ИКИР ДВО РАН с. Паратунка Камчатского края и на МЭС ТОИ ДВО РАН «мыс Шульца».

4.1 Предварительные исследования в лабораторных условиях.

Предварительные исследования были проведены в лабораторных условиях на Камчатке, с. Паратунка, ИКИР ДВО РАН. Трехзеркальный лазерный интерферометр (см рис. 15) устанавливался в лабораторном помещении на третьем этаже. Запись производилась в ночное время для уменьшения влияния воздействий, связанных с производственным процессом. Длина базы составляла 12 метров.

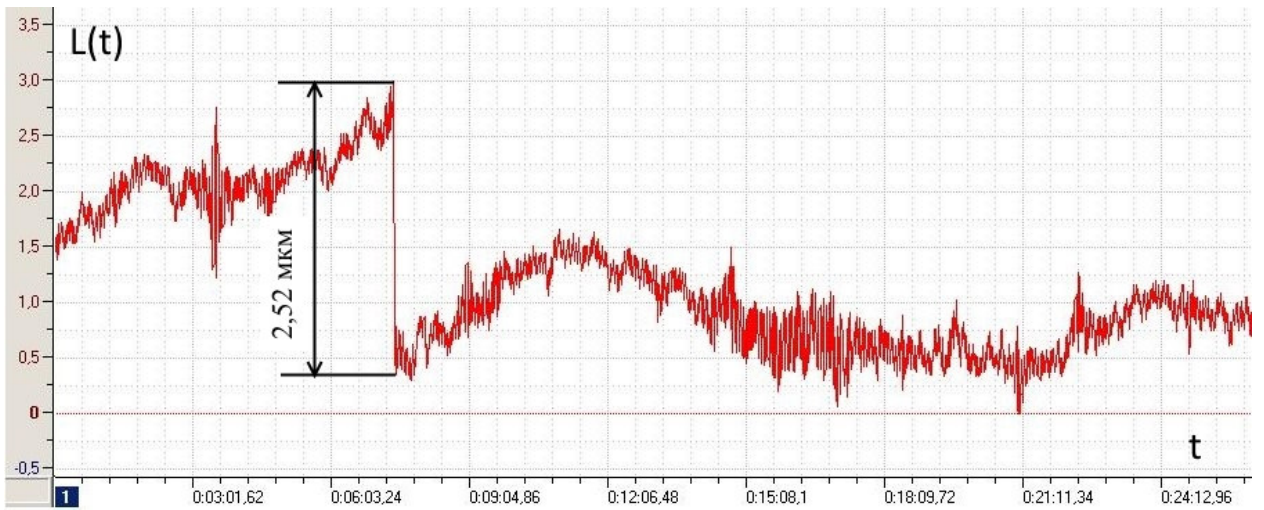


Рис. 26. Характерный вид сигнала продолжительностью 30 мин.

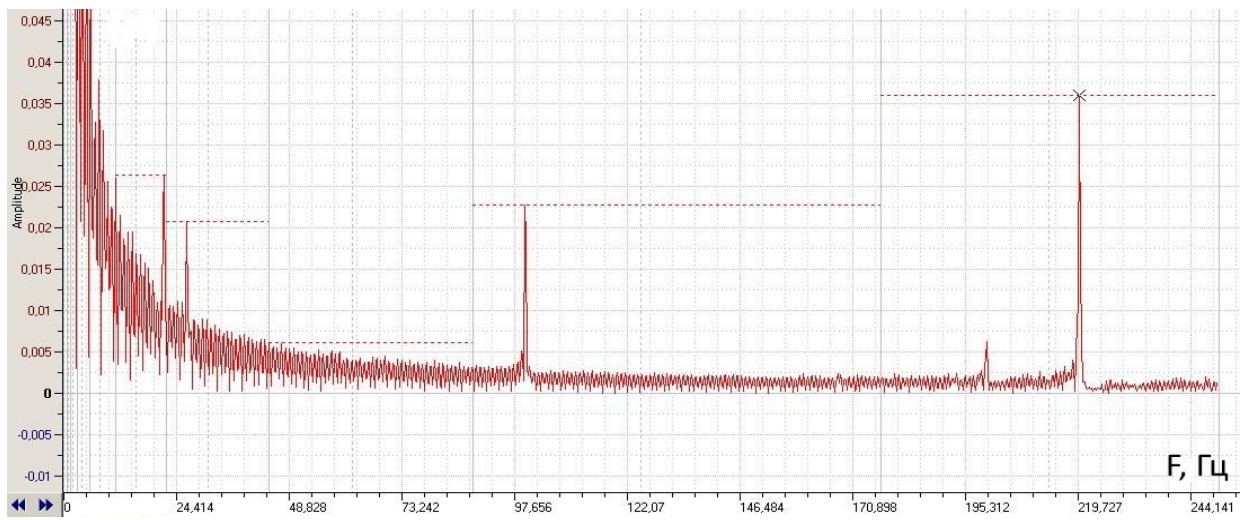


Рис. 27. Спектр сигнала при искусственном возмущении с частотой 220 Гц.

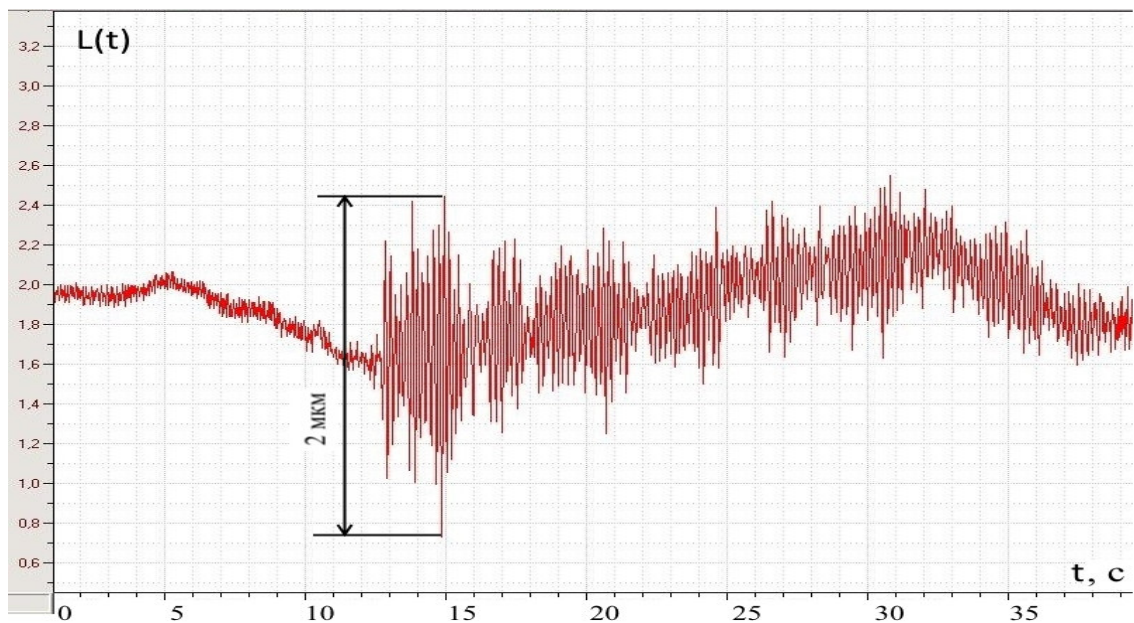


Рис. 28. Пример записи геофизического сигнала.

Характерный пример записей трехзеркального интерферометра-деформографа продолжительностью 30 мин показан на рис. 26. На рисунке 27 - спектр сигнала при искусственном возмущении с частотой 220 Гц. В качестве источника излучения применялась акустическая колонка от персонального компьютера, излучающая механические колебания в акустическом диапазоне частот. Присутствующая интенсивная компонента на частоте 100 Гц может быть связана с аппаратурной сетевой помехой, проникающей в канал регистрации. Программа спектральной обработки данных позволяет осуществлять фильтрацию данной помехи. На рисунке 28 показан пример записи геофизического сигнала.

На рисунке 29 наблюдается сейсмическое возмущение амплитудой 2 мкм с постепенным затуханием. В это время геофизической службой было зафиксировано землетрясение с магнитудой 4.3 в трехстах километрах от места наблюдения. (21.09.2009 14h 15m 36.4s, 53.13 N 162.71 E, h=19 km, m=4.3, у восточного побережья Камчатки, ГС РАН сейсмологический каталог сентябрь 2009 г.)

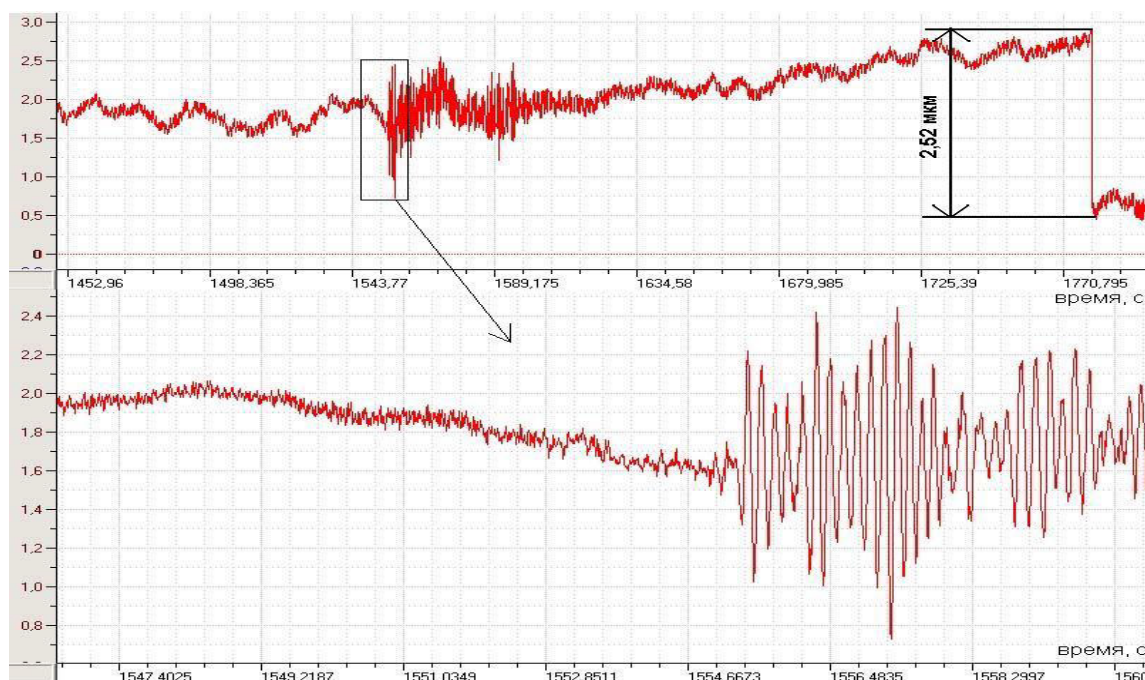


Рис. 29. Землетрясение с магнитудой 4.3 в трехстах километрах от места наблюдения. (21.09.2009 14h 15m 36.4s, 53.13 N 162.71 E, h=19 km, m=4.3, у восточного побережья Камчатки, ГС РАН сейсмологический каталог сентябрь 2009 г.).

4.2 Результаты испытаний модернизированного лазерного интерферометра-деформографа на геополлигонах (Фрязино, Камчатка, Владивосток).

4.2.1 Используемое оборудование и условия экспериментов

Для организации сбора геоакустических данных используется измерительный комплекс ИКИР ДВО РАН, расположенный на дне озера Микижа, который состоит из ориентированных по сторонам света 4-х гидрофонов. Использование широкополосных пьезокерамических гидрофонов для регистрации эмиссии, расположенных на дне искусственных и естественных водоемов является особенностью экспериментов. Использование приемников подобного типа позволяет по сравнению со стандартными геофонами расширить частотный диапазон регистрации до 0.1 Гц-11 кГц [97].

В ходе проводимых работ исследуются эффекты геоакустической эмиссии – излучения акустических волн горными породами при их деформировании, трещинообразовании и разрушении в процессе подготовки землетрясений. Для данных исследований применяется комплекс геоакустической аппаратуры, разработанный в ИКИР, который дополнен лазерным интерферометром-деформографом, разработанным в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Лазерный интерферометр-деформограф наземного типа построен по трехзеркальной схеме (см. Раздел 3, рис. 15). Измерительное плечо длиной 32 м защищено заполненным воздухом трубопроводом, состоящим из 8 асбестоцементных труб, установленных на металлических опорах высотой около 1 м (рис 30).



Рис. 30. Лазерный интерферометр-деформограф размещенный в ИКИР ДВО РАН. Температурный коэффициент для такого деформографа оценивается величиной:

$$dL/L_T = - 1 \cdot 10^{-6}, \text{ K}^{-1}$$

Деформационно-барический коэффициент имеет порядок:

$$dL/L_P = + 4 \cdot 10^{-7}, (\text{мм рт. ст.})^{-1}$$

Исходя из вышеприведенных формул, суточными колебаниями атмосферного давления и температуры, при выполнении геоакустических измерений (в диапазоне частот 10-1000 Гц), можно пренебречь. Однако, при выполнении длительных наблюдений на стабильность положения лазерного пучка влияют конвективные потоки воздуха в трубопроводе, возникающие вследствие суточных перепадов атмосферного давления и температуры. Для их устранения на торце трубопровода была установлена плоскопараллельная пластина в качестве оптического иллюминатора. Подобная модернизация интерферометра позволила существенно повысить его стабильность и увеличить длительность непрерывной записи регистрируемого сигнала.

На рис.31 представлен пример исходного деформационного сигнала длительностью 4 часа: с 12h12m по 16h10m GMT 31.07.2010 г. Устройство регистрации интерферометра работает в диапазоне $\pm 8 \lambda/2$ ($\pm 2,5$ мкм), при этом каждому вертикальному переносу начала отсчета системы регистрации соответствует смещение величиной 2,5 мкм.

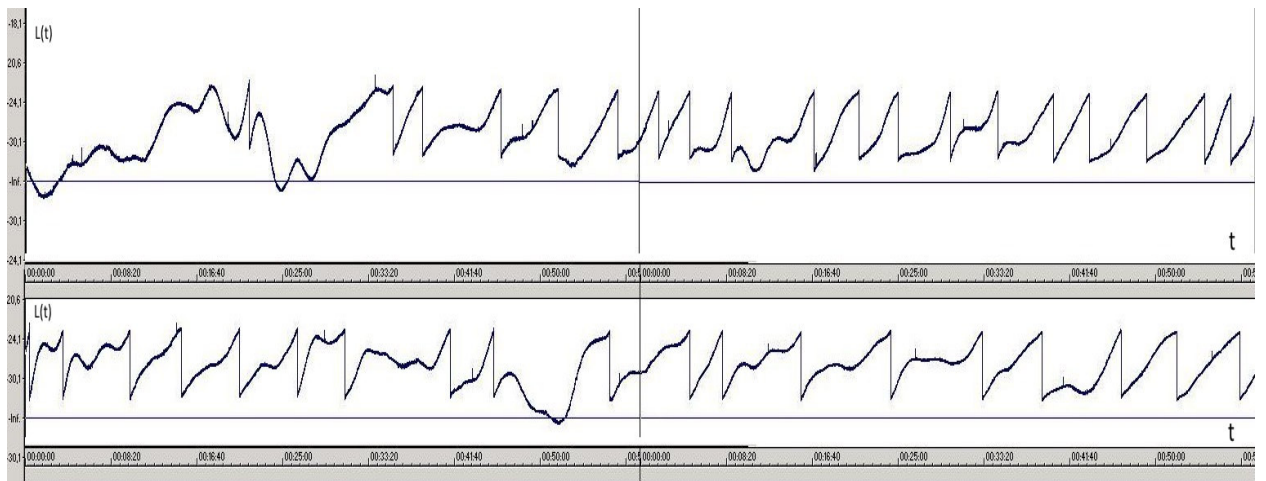


Рис. 31. Исходный деформационный сигнал длительностью 4 часа: с 12h12m по 16h10m GMT 31.07.2010.

В ходе экспериментальных испытаний лазерного интерферометра-деформографа получены записи ряда региональных сейсмических событий. На рис. 32 приведена запись деформаций земной поверхности во время землетрясения (показано стрелкой), которое произошло 31.07.2010 г. 16h10m GMT у побережья Камчатки.

Энергетический класс землетрясения $K=10$, расстояние от эпицентра до места регистрации $D=164$ км. Лазерным деформографом хорошо зарегистрированы вступления продольных и поперечных сейсмических волн с периодами от 0,1-0,4 с до 2-3 с и с амплитудами, не превышающими 2,5 мкм. Сопутствующие и предваряющие землетрясению волны с периодами 30-40 минут (показаны пунктирной стрелкой) вызваны атмосферными эффектами и могут быть отнесены к предвестниковым явлениям.

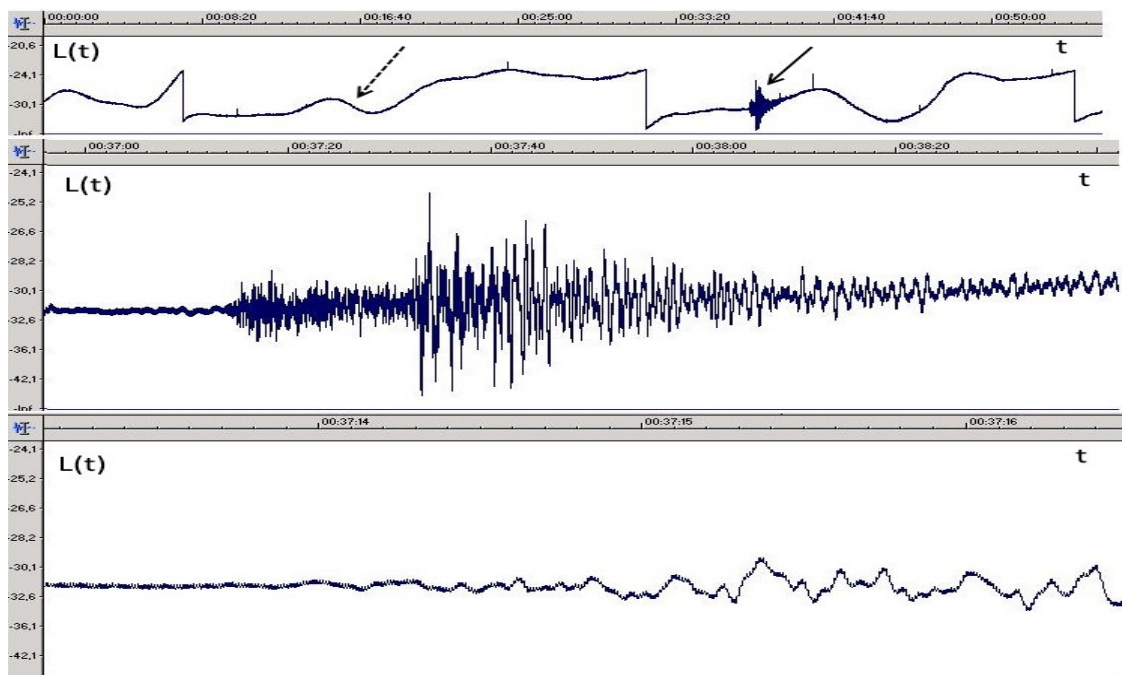


Рис. 32. Запись землетрясения 31.07.2010 г., $K=10$, база деформографа 32 м. Расстояние от эпицентра до пункта регистрации $D=164$ км, максимальная амплитуда записанных поверхностных сейсмических волн около 2,5 мкм.

Пример записи более мощного землетрясения (энергетический класс $K=10,6$) приведен на рис.33. Амплитуды поверхностных волн превышают 2,5 мкм, поэтому на записи присутствуют вертикальные переносы начала отсчета (см. нижний фрагмент на рис.33).

Разрывы записи, возникающие во время переноса начала отсчета, устраняются специальной программой при обработке сигналов деформографа.

В рамках проведенных испытаний было проверено влияние техногенных факторов на результаты регистрации деформографа. Движение автотранспортных средств по шоссе на расстоянии около 300 м от деформографа вызывает колебания грунта на частотах 17-19 Гц, амплитуда регистрируемых горизонтальных смещений грунта достигает $dL=0,2-0,3$ мкм (см. рис.34), что для относительных деформаций составляет величину порядка $dL/L=10^{-8}$.

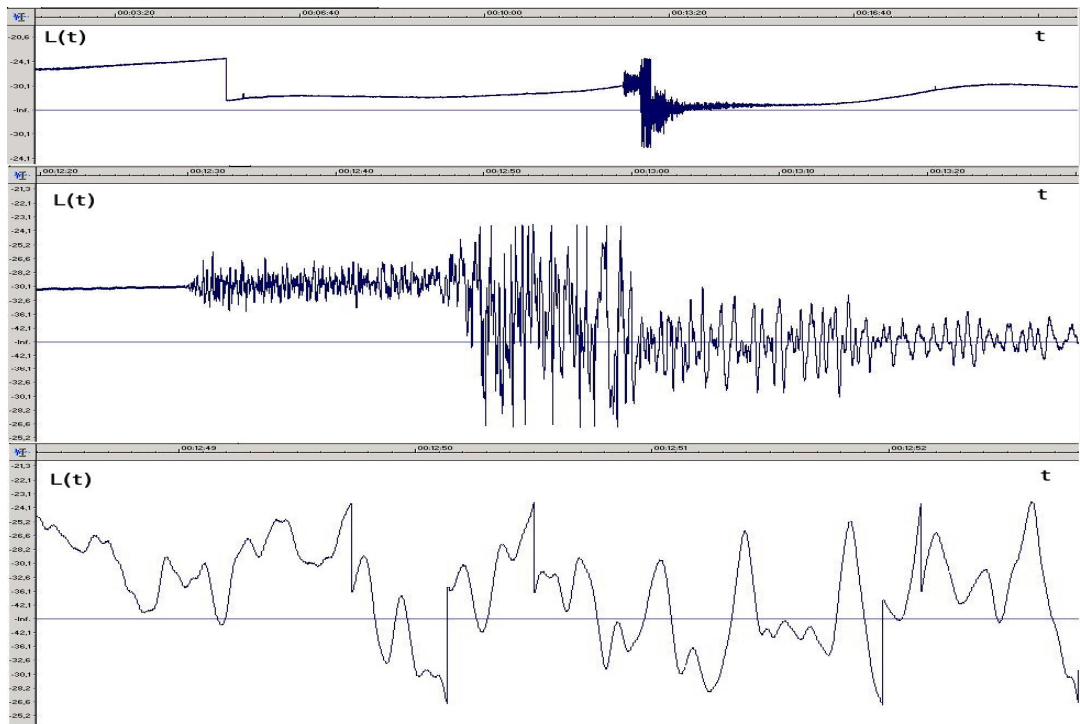


Рис. 33. Пример записи землетрясения (энергетический класс $K=10,6$).

Приблизительно такие же амплитудно-частотные параметры имеют сигналы, вызванные механическими ударами с силой в несколько десятков килограммов на земле на расстоянии около 40 м от деформографа (обозначено стрелкой на рис. 35).

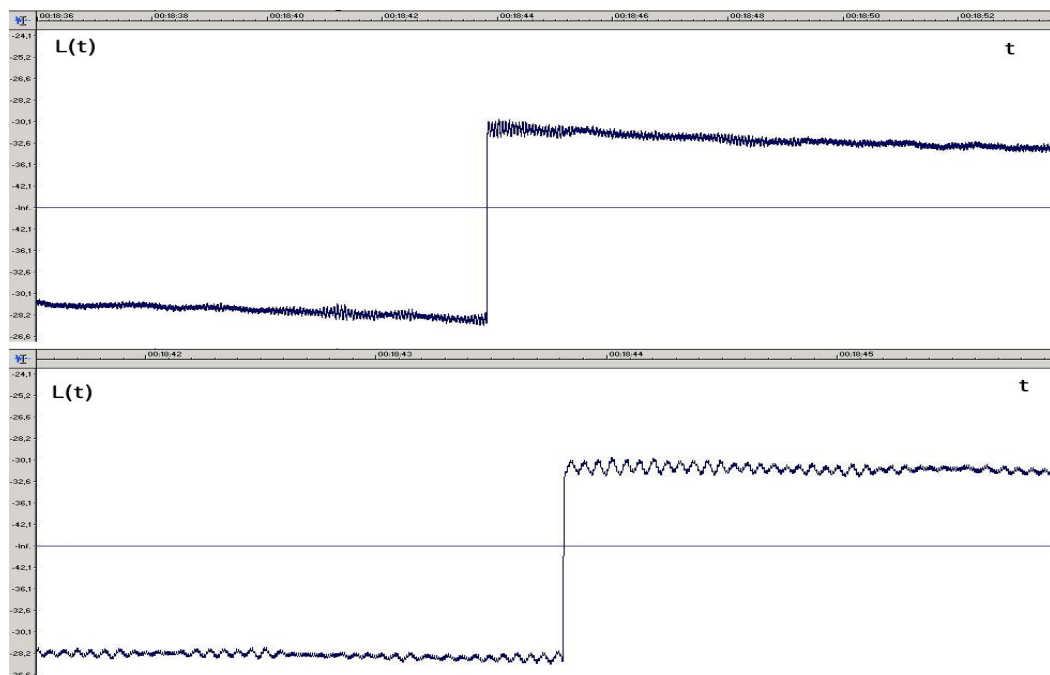


Рис. 34. Движение автотранспортных средств по шоссе на расстоянии около 300 м от деформографа.

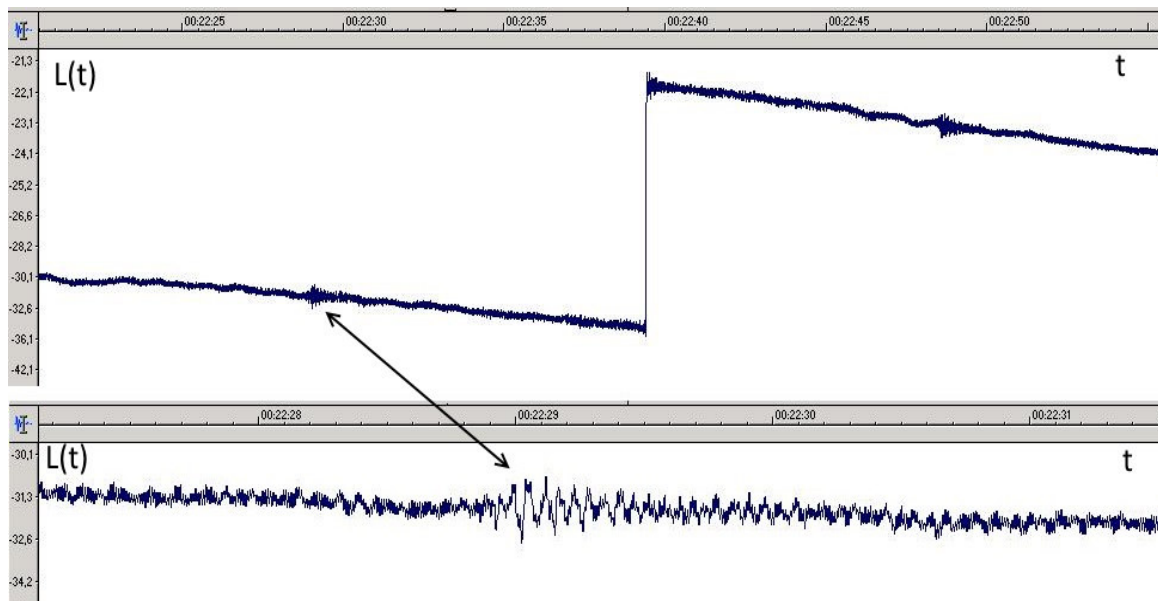


Рис. 35. сигналы, вызванные механическими ударами с силой в несколько десятков килограммов на земле на расстоянии около 40 м от деформографа.

4.2.2 Сейсмо-деформационный и акустический мониторинг геодинамических процессов высокочувствительными пространственно разнесенными приборами в сейсмоэнергоактивной и асейсмической зонах (Камчатка, Фрязино, Владивосток.)

Деформационные измерения в сейсмоэнергоактивной зоне (Камчатская обл., с. Паратунка) выполнялись лазерным интерферометром-деформографом наземного типа с измерительным плечом длиной 32 м, построенным по трехзеркальной схеме (см. Раздел 3, рис. 15). Новый усовершенствованный вариант лазерного деформографа длиной 18 м разработан и функционирует с января 2016 года (разработан в ИКИР ДВО РАН) [75].

Для наблюдений в асейсмической зоне (Подмосковье) использовались лазерные интерферометры с длиной плеча от 10 м до 400 м, установленные на подземной лучевой линии во Фрязино (рис 36). Здесь измерения проводятся с помощью инструментов, построенных как по схеме

неравноплечего интерферометра, так и по схеме равноплечего интерферометра Майкельсона (симметричного интерферометра, нечувствительного к коррелированным вариациям температуры и атмосферного давления).

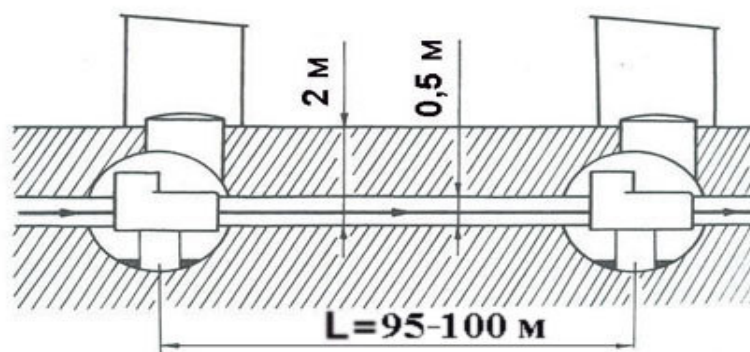


Рис. 36. Подземная лучеводная линия во Фрязино.

Получены и анализируются результаты измерений, выполненные аналогичными лазерными интерферометрами-деформографами длиной от 5 м до 90 м при их установке на глубине около 30 м в геофизической штольне в Обнинске.

Для изучения геоакустической эмиссии на различных стадиях развития процесса подготовки землетрясений в сейсмоэнергоактивной зоне применяется специально разработанная геоакустическая аппаратура, которая установлена в пунктах наблюдения «Карымшина» и «Микижа» (Камчатская обл.) Система измерения реализована направленными широкополосными пьезоэлектрическими гидрофонами, установленными в укрытых сверху искусственных водоемах, расстояния между гидрофонами от 5 до 50 м, частотный диапазон от сотен герц до первого десятка килогерц.

С помощью лазерного интерферометра-деформографа наземной установки с базой 32 м выполнен цикл геофизических наблюдений сейсмических, геоакустических и деформационно-барических процессов.

Представлена методика и результаты наблюдений сейсмо-деформационных и геоакустических процессов глобального характера при их параллельной регистрации лазерными деформографами и геоакустическими приборами, разнесенными в пространстве на значительные расстояния (Камчатка - Подмосковье, около 6,8 тыс. км).

Различие в зарегистрированных сейсмо-деформационных сигналах (рис. 37) обусловлено разными величинами эпицентральных расстояний, азимутальными ориентациями инструментов и локальными условиями. Время прихода поверхностных волн на каждый из пунктов регистрации сдвинуто относительно t_0 на 30-40 минут, что соответствует скоростям распространения этих волн 2,7-3,6 км/с.

На обеих записях, кроме случайных деформационно-барических и термоупругих вариаций, отмечаются также и коррелированные составляющие зарегистрированных деформаций, которые могут представлять интерес для исследования взаимодействия глобальных геофизических процессов в земной коре, атмосфере и Мировом океане. Развитие процесса подготовки рассматриваемого землетрясения (Юго-западнее Суматры 02.03.2016 г., $M_s=7,6$) сопровождалось интенсивной циклонической активностью в Южной части Тихого океана: 7–25 февраля мощный тропический циклон наивысшей категории 5 SSHWS перемещался в западном направлении и 26.02, войдя в зону Австралийского региона, разрешился ливневыми осадками, прекратив свое существование 03 марта 2016 г.

Показан пример параллельной регистрации процессов глобального характера пространственно разнесенными лазерными деформографами (Подмосковье) и геоакустическими приборами (Камчатка). Демонстрируются результаты анализа сигналов геоакустической эмиссии и микросейсмических

колебаний земной поверхности в течение четырех суток, предшествующих сильнейшему землетрясению 2015 года: 16 сентября, побережье Центрального Чили, $M_s=8,3$ ($t_0=22h54m$) рис. 38. На двух верхних диаграммах приведены фрагменты непрерывной регистрации геоакустических сигналов при одновременном осуществлении их цифровой фильтрации в диапазонах частот: 2,5–6,5 кГц (рис. 38, пункт наблюдения «Микижа») и 7–11 кГц (рис.38, пункт наблюдения «Карымшина»). Временное разрешение при осреднении составляет около 1 с. В нижнем ряду (рис. 38) представлена последовательность спектрально-временных СВАН-диаграмм для микросейсмических колебаний земной поверхности, зарегистрированных в этот же период 100-метровым лазерным деформографом во Фрязино. Анализируемый диапазон частот 0,5-2,5 Гц, временное разрешение для каждой из приведенных СВАН-диаграмм меньше 1 мин. Наблюдаются значимый рост геоакустических и перестройка микросейсмических сигналов за 30-50 час до землетрясения 16.09.2015 г.

В то же время интенсивные геомагнитные возмущения 14-15.09 величиной 80 -100 нТ отмечены станциями Восточного и Западного полушария ($K=5$, www.intermagnet.org), а также геостационарными спутниками GOES NOAA ([ftp.swpc.noaa.gov](ftp://ftp.swpc.noaa.gov)).

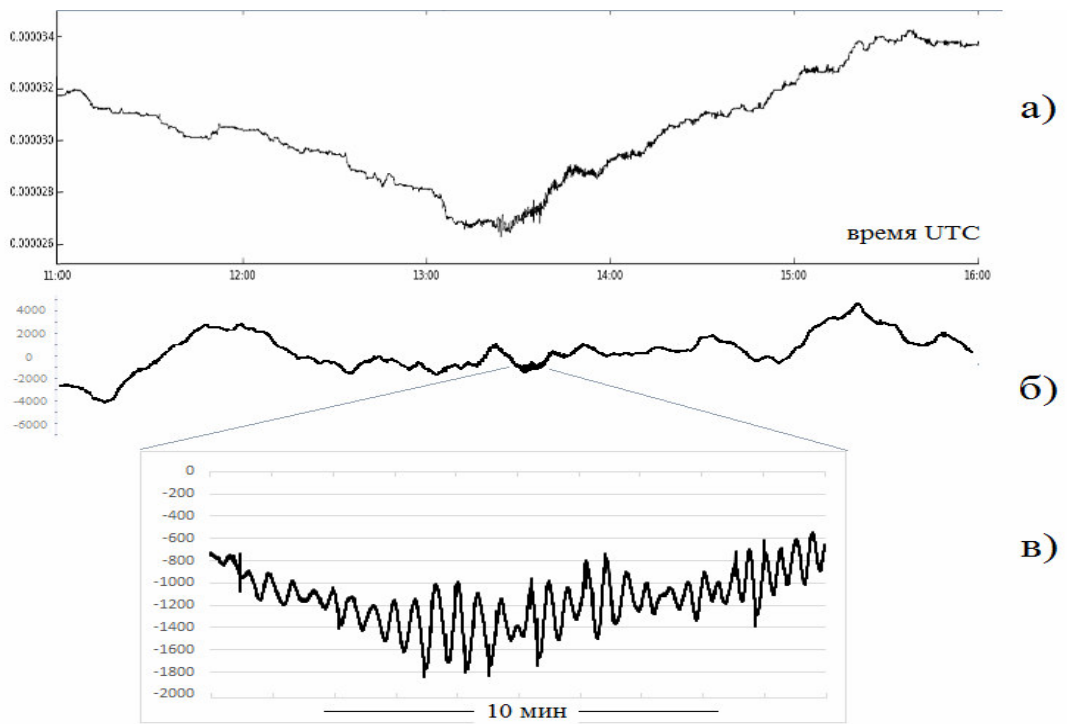


Рис 37. Сейсмо-деформационные процессы, сопровождающие землетрясение Юго-западнее Суматры 02.03.2016 г., $M_s=7,6$ а) 32-метровый лазерный деформограф в Паратунке б) Подземный Лучеводный полигон во Фрязино .

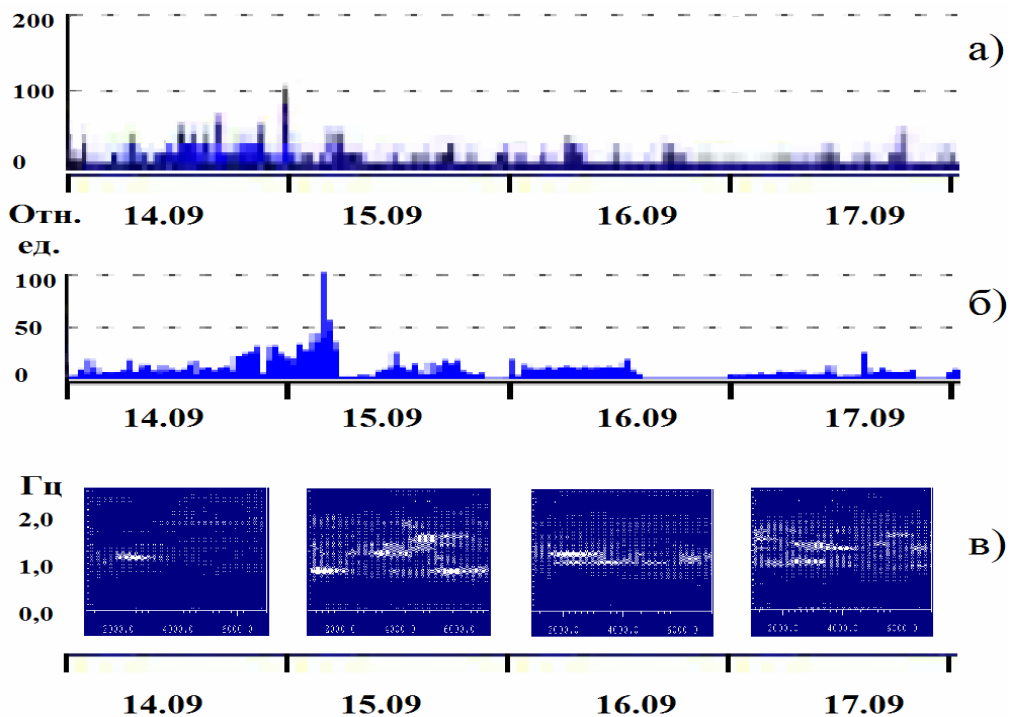


Рис 38. Результаты анализа сигналов геоакустической эмиссии и микросейсмических колебаний перед землетрясением 16.09. 2015 г. Чили, $M_s=8,3$ а) пункт наблюдения «Микижа» б) пункт наблюдения «Карымшина» в) пункт наблюдения Фрязино.

На рис. 39 представлена запись и результаты обработки сейсмодеформационного сигнала от землетрясения 29 апреля 2006 г. (Камчатка, $M_s=7,0$), зарегистрированного 300-метровым лазерным деформографом, расположенным на полигоне во Фрязино. Обработка выполнена программой спектрально-временного анализа с 25% скользящим окном. Максимальная амплитуда поверхностных сейсмических волн составляет 2,1 мкм. Спектральная обработка позволяет выделить составляющие сигнала с предельной минимальной амплитудой 0,1-1 нм, что соответствует величине относительных деформаций $10^{-11} - 10^{-12}$ при длине измерительного плеча 300 метров.

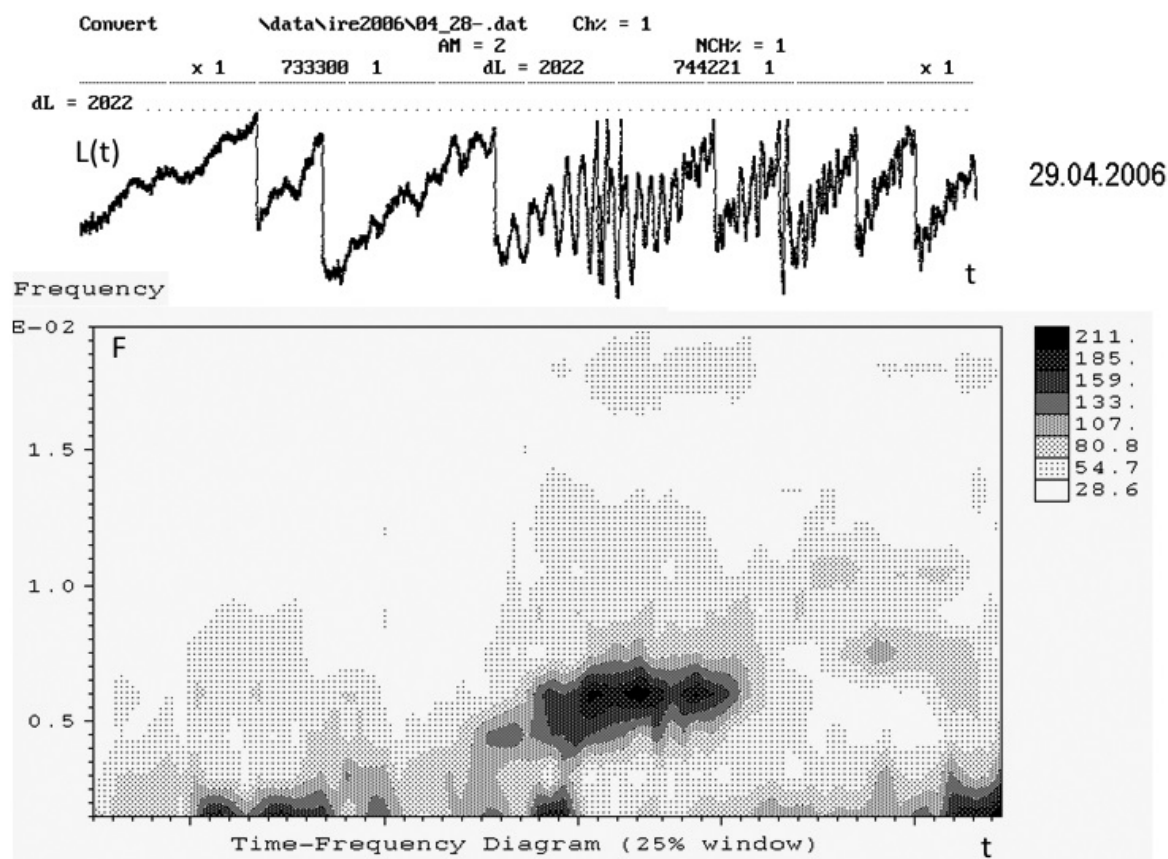


Рис. 39. Запись и результат обработки сигнала от землетрясения 29 апреля 2006 г.

По итогам испытаний мобильного лазерного деформографа в 2006 г. на МЭС ТОИ «м. Шульца» проводились исследования в сентябре 2007г. Были осуществлены установка и настройка трехзеркального лазерного интерферометра-деформографа в подземном приборном помещении, а также

выполнен ряд сеансов непрерывных наблюдений деформационных сигналов различной природы в диапазоне частот от 10^{-5} Гц до $0,3 \cdot 10^3$ Гц. Были исследованы два варианта установки интерферометра-деформографа: с измерительной базой $L_1=20$ м и с измерительной базой $L_2=7$ м. Выполнялось сопоставление полученных результатов с данными стационарного лазерного деформографа ТОИ с измерительной базой 52,5 м, который расположен на расстоянии около 100 м и ориентирован под прямым углом к трехзеркальному интерферометру-деформографу.

Примеры записей выходного сигнала интерферометра-деформографа приведены на рис 40.

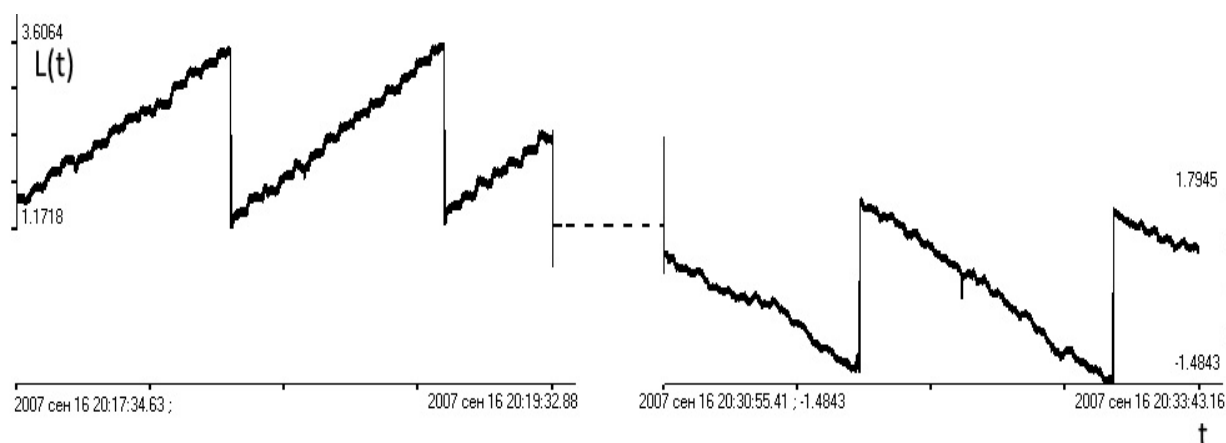


Рис. 40. Характерный вид регистрируемых деформационных сигналов.

На этом рисунке показан характерный вид регистрируемых деформационных сигналов в диапазоне низких частот при изменении направления деформаций. Из-за особенностей регистрирующей системы на записи наблюдаются разрывы сигнала. Фазовые сдвиги интерференционного сигнала фиксируются цифроаналоговым фазометром (ЦАФ), подключенным к фотоприемнику и опорному модулирующему генератору. ЦАФ, построенный на основе управляемого реверсивного счетчика и цифроаналогового преобразователя имеет 4 диапазона однозначной регистрации: $\pm 1 \lambda/2$, $\pm 8 \lambda/2$, $\pm 64 \lambda/2$ и $\pm 512 \lambda/2$, которые соответствуют диапазонам измеряемых перемещений ± 316 нм, $\pm 2,5$ мкм, ± 20 мкм и ± 160 мкм. При достижении предела разрядности происходит переключение

счетного механизма в среднюю точку (8 единиц в диапазоне $\pm 8 \lambda/2$, одна единица соответствует перемещению на длину $\lambda/2$). Переброс «сверху» получается 7 единиц или 2,31 В, «снизу» - 8 или 2,64 В. Для устранения этих перебросов нами разработан ряд компьютерных программ, выполняемых на стадии предварительной обработки данных (см. раздел 3.3).

Изменения сигнала на входе АЦП составляют от $-1,4843$ В до $+3,6064$ В, что соответствует изменениям длины dL от 0 до $15 \lambda/2$. Отсюда коэффициент преобразования смещения в напряжение получается равным $1,074$ мВ/нм. Поскольку эффективная разрядность по отношению сигнал/шум для АЦП типа E14-140 в указанном диапазоне напряжений составляет 13.2 бит или минимальная чувствительность $0,25$ мВ, получим расчетную чувствительность лазерного интерферометра-деформографа $0,23$ нм на одну условную единицу цифровой записи. При временном усреднении, выполняемом, например, программой спектральной обработки, эффективная чувствительность может быть улучшена.

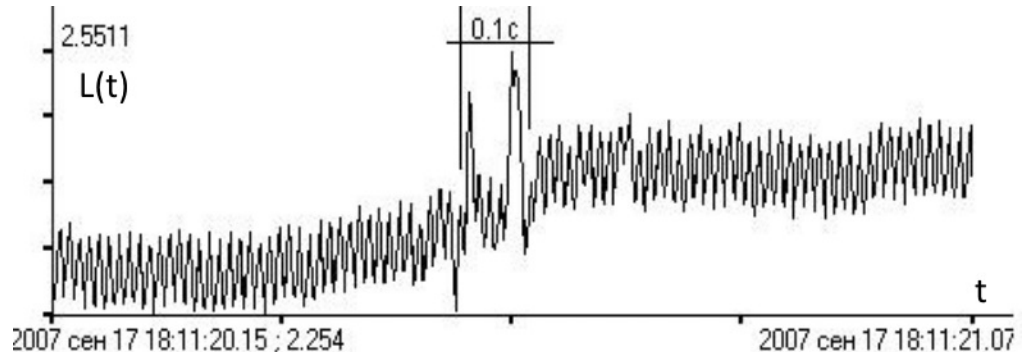


Рис 41. Регистрация импульсного микросейсмического возмущения длительностью порядка 0,1 с.

Характерный пример высокочастотных записей трехзеркального интерферометра-деформографа показаны на рис. 41. На этом рисунке наблюдается импульсное микросейсмическое возмущение длительностью порядка 0,1 с. Присутствующая интенсивная компонента на частоте 100 Гц может быть связана с аппаратурной сетевой помехой, проникающей в канал регистрации. Программа спектральной обработки данных позволяет осуществлять фильтрацию данной помехи.

При сопоставлении данных двух синхронно работающих деформографов в сейсмоакустическом диапазоне частот отмечается один необычный процесс (рис.42). На записях наблюдаются возмущения ударного типа, которые имеют вид коротких импульсов (длительностью 0,15 с) для 20-метрового деформографа (рис.42б). В это же время, 52,5-метровый деформограф, расположенный в ста метрах и направленный под прямым углом, синхронно регистрирует цуги колебаний на частоте около 40 Гц (рис. 42в). Наблюдаемые цуги имеют такую же длительность. Эффект практически не наблюдается при изменении знака деформации импульсов на противоположный.

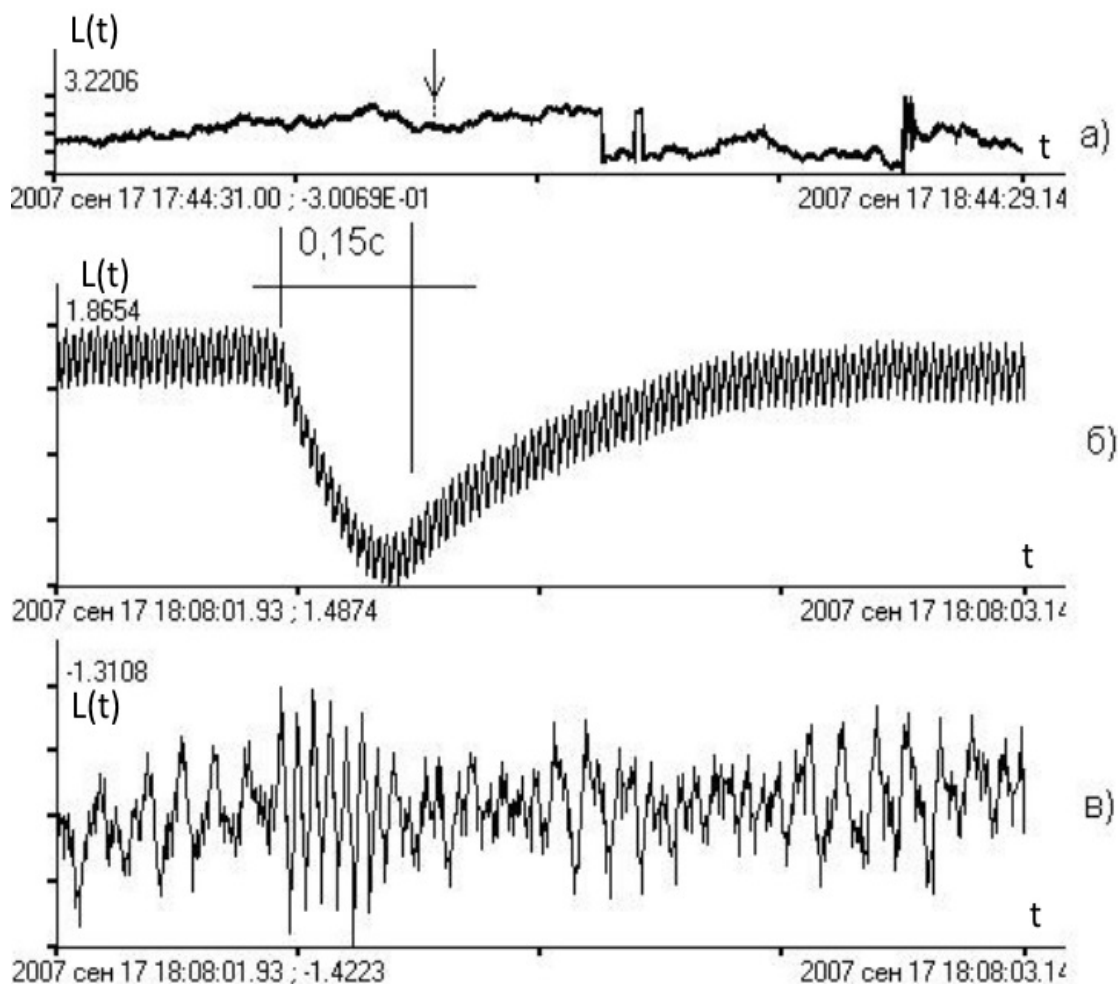


Рис 42. Возмущения ударного типа записанные разными деформографами: а,б - 20-метровый деформограф, в - 52,5-метровый деформограф; длительность записей а - 1 час, б,в - 1,2 секунды.

На основе методов прецизионной лазерной интерферометрии разработаны новые экспериментальные измерительные устройства. Проведены исследования и комплексные испытания экспериментальных макетов трехзеркального лазерного деформографа. По совместной программе выполнены натурные наблюдения геофизических процессов на Лучеводном полигоне ИРЭ РАН и на экспериментальной базе ТОИ ДВО РАН (морская экспедиционная станция «Мыс Шульца»). Испытаны экспериментальные макеты мобильного лазерного деформографа, получены цифровые записи сейсмических волн от землетрясений и других деформационных процессов.

В настоящее время нами проводится модернизация и разработка портативного варианта лазерного деформографа, который позволит проводить оперативную установку прибора на местности, выполнять измерения в отдаленных и трудно доступных районах.

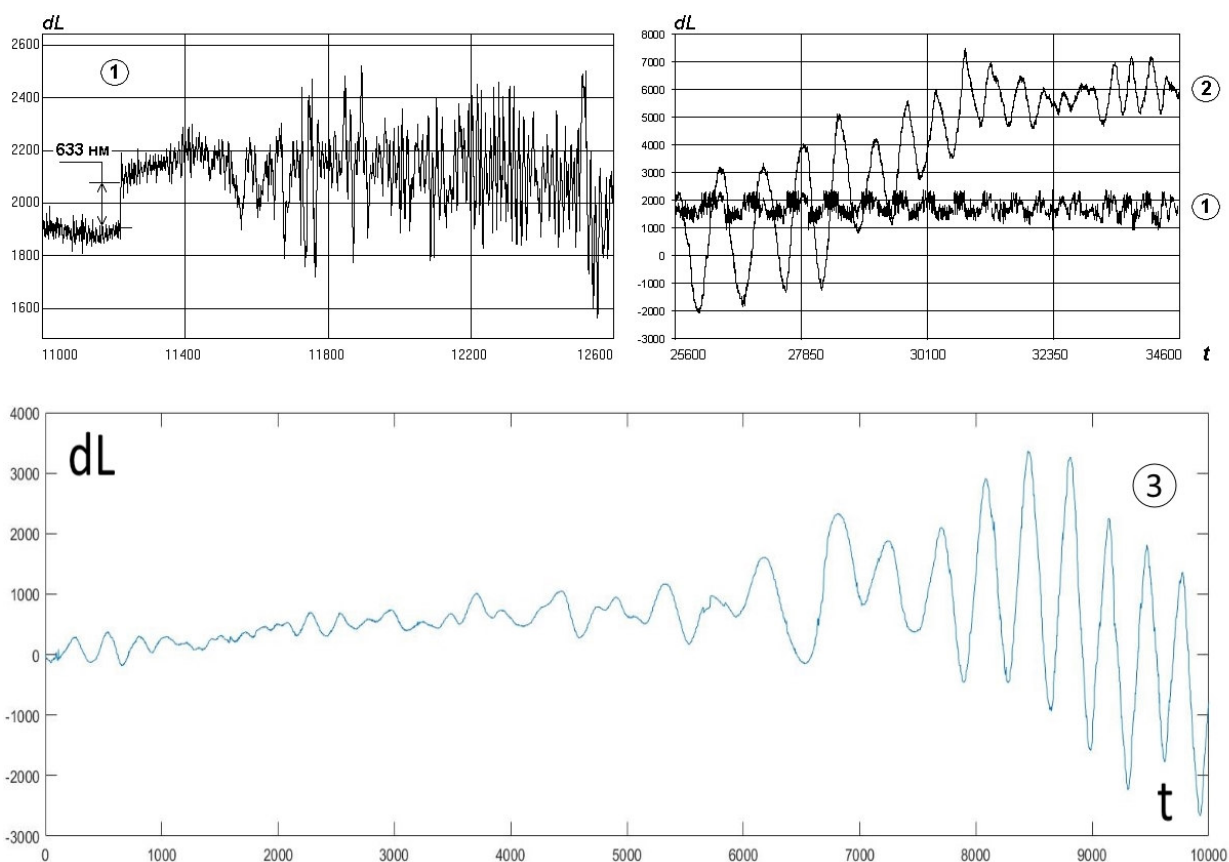


Рис. 43. Запись землетрясения $M_b=7,1$ в Пакистане 16.04.2013 г., полученная на Лучеводном полигоне, Фрязино.

На рис. 43 показана запись землетрясения $M_b=7,1$ в Пакистане 16.04.2013 г., полученная на Лучеводном полигоне, Фрязино, база интерферометра 100 м; 1- нефильтрованный интерферометрический сигнал (633 нм - инструментальный перенос начала отсчета, $dt = 47,6$ мс), 2 - результат программной линейризации сигнала; 3 - вступление поверхностных сейсмических волн, вызванных землетрясением в Мексике 08.09.2017, $M_s=8,3$; показан фрагмент регистрации 100-метровым несимметричным интерферометром на полигоне во Фрязино длительностью около 18 минут 5h 26m 49s - 5h 45m 05s GMT, после обработки сигнала, устраняющей разрывы, связанные с переключением счетчика в среднюю точку при достижении выбранного предела.

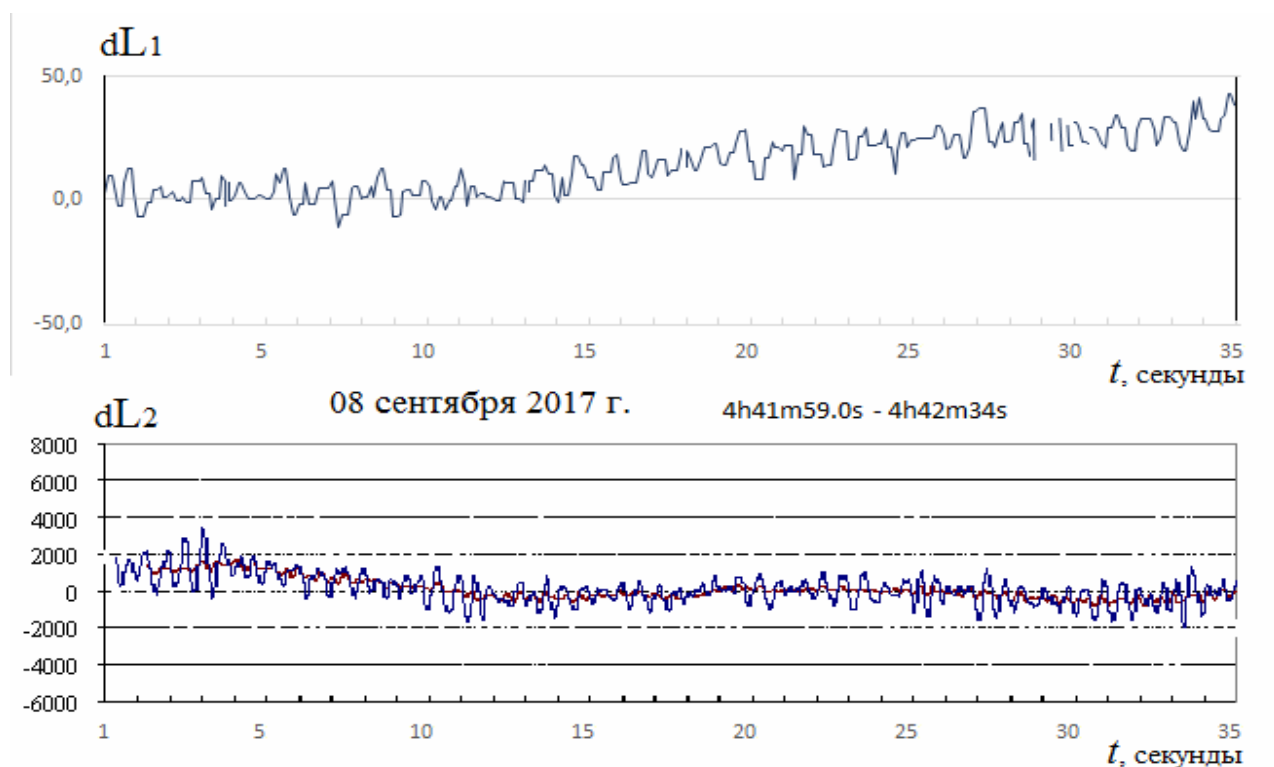


Рис. 44. Деформации земной поверхности, зарегистрированные за несколько минут до землетрясения в Мексике 08.09.2017 ($M_s=8,3$) двумя 100-метровыми интерферометрами на полигоне во Фрязино.

На рис. 44 показаны деформации земной поверхности, зарегистрированные за несколько минут до землетрясения в Мексике

08.09.2017 ($M_s=8,3$) двумя 100-метровыми интерферометрами на полигоне во Фрязино: dL1 - несимметричный интерферометр, dL2 - равноплечий интерферометр; расстояние между интерферометрами 400 м.

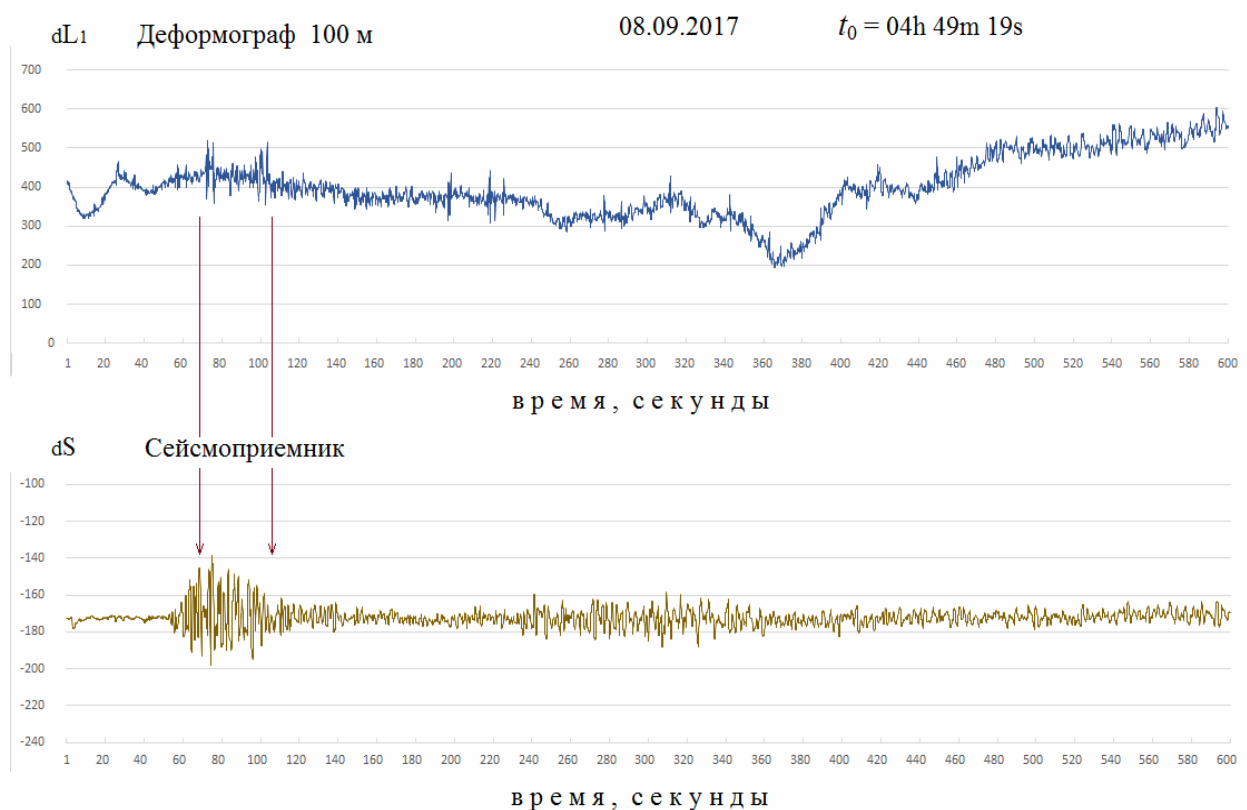


Рис. 45. Вступление объемных сейсмических волн, зарегистрированных синхронно лазерным деформографом (100 м) и сейсмоприемником SNG-11D (GeoSpace) через 13,5 мин после землетрясения.

На рис. 45 показано вступление объемных сейсмических волн, зарегистрированных синхронно лазерным деформографом (100 м) и сейсмоприемником SNG-11D (GeoSpace) через 13,5 мин после землетрясения. Амплитуда зарегистрированных колебаний относительно уровня шумов имеет один порядок.

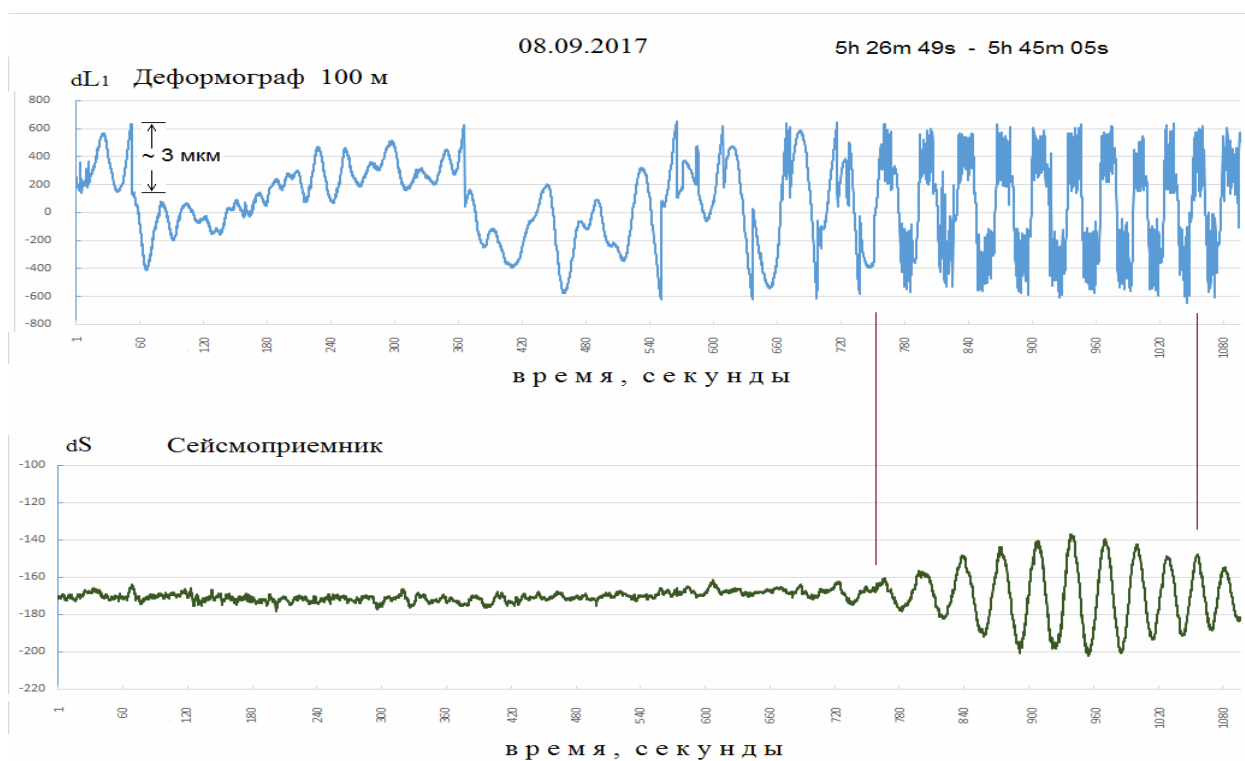


Рис. 46. Запись поверхностных сейсмических волн спустя 40-55 мин после землетрясения.

Запись поверхностных сейсмических волн получена теми же приборами спустя 40-55 мин после землетрясения (см. рис. 46). Для лазерного деформографа амплитуда зарегистрированных колебаний на 1-2 порядка выше, чем у сейсмоприемника (частотная характеристика сейсмоприемника при регистрации скорости смещений резко падает на низких частотах). На рис. 47 изображена спектрально-временная диаграмма сигнала Мексиканского землетрясения, 8-го сентября 2017 г.

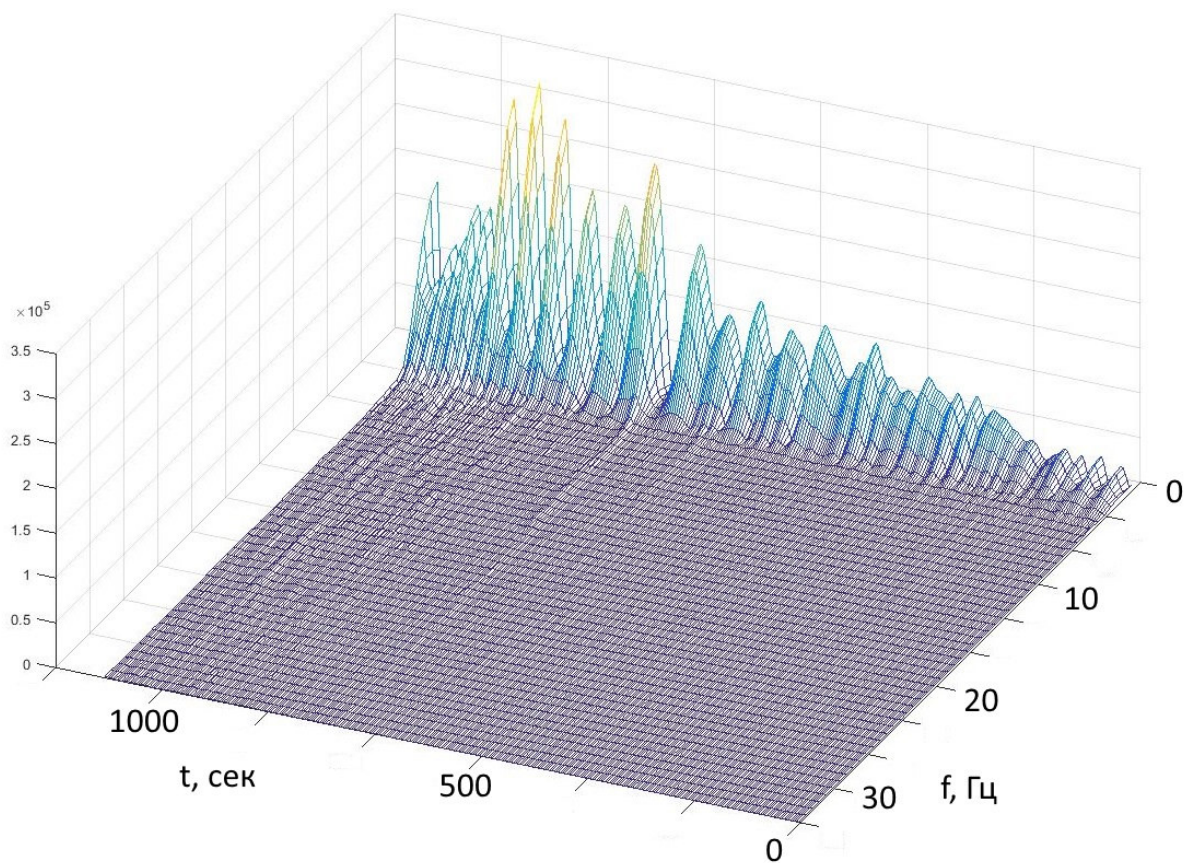


Рис. 47. Спектрально-временная диаграмма сигнала Мексиканского землетрясения, 8-го сентября 2017 г.

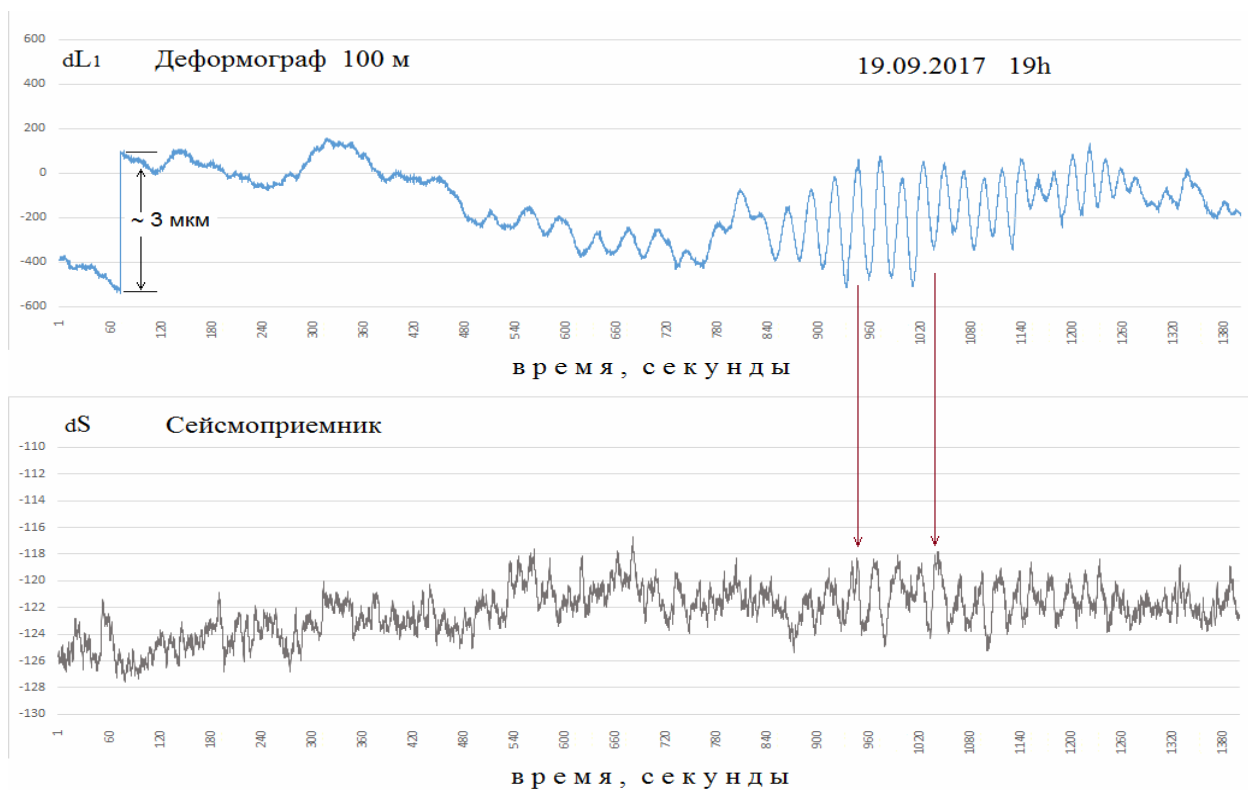


Рис. 48. Запись землетрясения Мексика 19.09.2017 M=7.

Для другого, более слабого землетрясения (Мексика 19.09.2017 M=7) максимальный размах колебаний, зарегистрированных лазерным деформографом (100 м) поверхностных волн составляет около 3 мкм ($10\lambda/2$ или 10 периодов интерферограммы), соотношение сигнал/шум более 30 дБ. Для сейсмоприемника амплитуда зарегистрированных колебаний находится на уровне шумов (см. рис. 48).

Таким образом на основе методов прецизионной лазерной интерферометрии разработаны новые экспериментальные измерительные устройства. Проведены исследования и комплексные испытания экспериментальных макетов трехзеркального лазерного деформографа. Выполнены натурные наблюдения геофизических процессов на Лучеводном полигоне ИРЭ РАН и на экспериментальной базе ТОИ ДВО РАН (морская экспедиционная станция «Мыс Шульца»). Испытаны экспериментальные макеты мобильного лазерного деформографа, получены цифровые записи сейсмических волн от землетрясений и других деформационных процессов. Выполнены натурные наблюдения геофизических процессов в с. Паратунка Камчатского края ИКИР ДВО РАН. С помощью деформографа проведены исследования высокочастотных сейсмических и акустических процессов в энергоактивном регионе Камчатки. Данный регион характеризуется наличием геотермальных источников, повышенной сейсмичностью и находится вблизи зоны активного вулканизма.

В ходе экспериментальных испытаний лазерного интерферометра-деформографа были получены записи ряда региональных сейсмических событий и проверено влияние техногенных факторов на результаты регистрации деформографа. Движение транспортных средств по шоссе на расстоянии около 300 м от деформографа вызывает колебания грунта с частотами 17-19 Гц, амплитуда регистрируемых горизонтальных смещений грунта достигает $dL = 0,2-0,3$ мкм., что для относительных деформаций составляет величину порядка $dL / L = 10^{-8}$. Приблизительно одинаковые

амплитудно-частотные параметры имеют сигналы, вызванные механическими возмущениями ударного типа с силой в несколько десятков килограммов на земле на расстоянии около 40 м от деформографа.

Созданные версии лазерных деформографов могут быть эффективными при решении различных задач: геологические, геофизические и экологические услуги, строительство, инженерная инфраструктура и т. д. С их помощью можно также оценить фоновые процессы в естественных условиях, в том числе на промышленных и строительных площадках, в метро и на шахте, в экспедициях и обсерваториях.

Заключение

Итогом выполненной диссертационной работы являются следующие основные результаты.

1. Предложен новый метод интерферометрических измерений деформаций с методиками линеаризации и цифровой обработки для достижения высокой точности регистрации деформаций $\Delta L/L = 10^{-11}-10^{-12}$ в широком динамическом до 200 дБ диапазоне.

Метод основан на управлении параметрами излучения трехзеркального лазерного интерферометра, работающего на больших базах (от 3 м до 300 м), при суперпозиции двух независимых модуляционных процессов. Один из них осуществляется с помощью электрооптического модулятора, частота модуляции задается пилообразным опорным напряжением (30 кГц) от внешнего источника, это позволяет регистрировать интерференционный сигнал и в отсутствие деформационных колебаний. Второй модуляционный процесс обусловлен изменениями длины измерительного плеча интерферометра в соответствии с деформационными колебаниями. В этом случае параметрами излучения управляют путем медленной непрерывной автоподстройки длины резонатора лазера в процессе работы в соответствии с изменениями измерительного плеча интерферометра.

Метод реализован при участии автора в лабораторных условиях и на Лучеводном полигоне ФИРЭ РАН, на Камчатке (с.Паратунка, полигон ИКИР ДВО РАН, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук), а также во Владивостоке (полигон ТОИ, Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН).

2. Предложена двумерная модель трехзеркального лазерного резонатора, для которого в квазиоптическом приближении сформулирована система интегральных уравнений, описывающих поведение электромагнитного поля в данной системе. На основе анализа решений,

численных расчетов и экспериментального моделирования обнаружены режимы нестабильной 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.

3. Проведены исследования и комплексные испытания экспериментальных макетов трехзеркального лазерного интерферометра-деформографа. Показана возможность применения разработанных методов для интерферометрических измерений деформаций, возникающих в результате искусственных сейсмоакустических звуковых колебаний от внешнего генератора, а также для выделения глобальных геофизических явлений.

Впервые на Камчатке (с. Паратунка, геофизический полигон ИКИР ДВО РАН) и в Подмосковье (Фрязино, полигон ФИРЭ) с помощью длиннобазовых интерферометров проведены синхронные параллельные и независимые исследования акустических, микросейсмических и деформационно-барических процессов, и проведен сравнительный анализ. Впервые зарегистрированы независимо спектрально-временные диаграммы деформационных и геоакустических сигналов, обусловленных землетрясениями в Непале (12 мая 2015г.) и у побережья Центрального Чили (16.09.2015г), а также выделены происходившие в течение четырех суток процессы, предшествующие землетрясению в Чили. Получено соответствие интерферометрических и акустических данных (данных, полученных интерферометром-деформографом и геоакустическими приборами).

4. Показана возможность сейсмо-деформационного и акустического мониторинга геодинамических процессов на основании подтверждения результатов сравнительных измерений разными методами и разными высокочувствительными пространственно-разнесенными приборами в сейсмо-энергоактивных зонах. Трехзеркальный лазерный интерферометр –

деформограф (разработка ФИРЭ РАН, метод лазерной интерферометрии) установлен во Фрязино (Лучеводный полигон ФИРЭ) и на экспериментальной базе ИКИР ДВО РАН (с. Паратунка, Камчатка). Измерительный комплекс ИКИР ДВО РАН, состоящий из 4-х гидрофонов, ориентированных по сторонам света, установлен на дне озера Микижа (с. Паратунка). Совпадение результатов, полученных разными методами подтверждают достоверность регистрируемых данных, с помощью интерферометра-деформографа.

Созданные автоматизированные интерферометрические установки при применении разработанного метода лазерной интерферометрии высокой точности на основе частотной модуляции в сочетании с предложенными методиками определения параметров обратной связи и цифровой обработки интерферометрических данных позволили:

А) измерить амплитудно-временные характеристики акустических и сейсмических колебаний в широком динамическом диапазоне до 200дБ с достигнутой чувствительностью регистрации деформаций 10^{-12} .

Б) зарегистрировать сейсмические процессы и предвестники процессов, подтвержденные синхронными наблюдениями, что открывает возможность применения разработанных методов для выделения глобальных геофизических явлений, связанные с подготовкой сильных землетрясений $M > 7$, прохождением мощных тропических ураганов, тайфунов, цунами и крупномасштабных явлений в околоземном пространстве.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для усовершенствования методов измерений и создания новых приборов. Возможна разработка способов уменьшения паразитного влияния отраженного излучения от устанавливаемых приборов на пути пучка и коррекции частоты лазера при использовании управляемого подвижного зеркала. Полученные результаты позволяют повысить стабильность работы и точность трехзеркального интерферометра-деформографа, в котором используется обратное отражение для регистрации перемещений.

Рассмотренные лазерно-интерферометрические методы могут быть использованы для определения параметров наноразмерных материалов и покрытий, например, при измерении коэффициентов упругости, теплового расширения, изучении электрофизических и нелинейных свойств материалов, используемых в нанотехнологии.

Разработанные методики могут использоваться при решении различных научных и прикладных задач:

- изучение динамики сейсмических и геофизических полей, связанных со стихийными бедствиями (землетрясения и ураганы),
- проведение оценки фоновых процессов в натуральных условиях, включая промышленные и строительные объекты, подземные и горные выработки.

Список цитируемой литературы:

1. Lang, R. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties / R. Lang, K. Kobayashi // IEEE Journ. Quant. Electron. – 1980. – vol. 16. – № 3. – pp. 347-355.
2. Усанов, Д.А. Определение расстояния до объекта с помощью частотно-модулированного полупроводникового лазерного автодина / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, К.С. Авдеев // Письма в ЖТФ. – 2007. – т. 33. – № 21. – С. 72-77.
3. Соболев, В.С. Одновременные измерения дальности и скорости диффузно рассеивающих объектов методами активной лазерной интерферометрии с линейной частотной модуляцией / В.С. Соболев [и др.] // Автометрия. – 2012. – т. 48. – № 3. – С. 121-129.
4. Борн, М. Основы оптики. / М. Борн, Э. Вольф. // Перевод с английского. С. Н. Бреуса, А. И. Головашкина, А. А. Шубина. Издание 2-е. Исправленное. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы. – 1973. – 720 с.
5. Франсон, М. Когерентность в оптике / М. Франсон, С. Сланский // пер. с франц., М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы. – 1967. – 79 с.
6. Матвеевко, Л.И. О радиоинтерферометре с большой базой / Л.И. Матвеевко, Н.С. Кардашев, Г.Б. Шоломицкий, // Изв. высших учебных заведений. – 1965. – т. 8. – № 4. – С. 651-654.
7. Шануров, Г.А. Учет влияния геодинимических явлений на результаты измерений в длиннобазисной радиоинтерферометрии / Г.А. Шануров // Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1991. – № 6. – С. 25-31.
8. Кардашев, Н. С. Космическая радиоастрономия / Н. С. Кардашев // Земля и Вселенная. – 2005. – № 3. – С. 3-12.
9. Финкельштейн, А. М. Фундаментальное координатно-временное обеспечение / А. М. Финкельштейн // Вестник РАН. – М.: Наука. – 2007. – т. 77. – № 7. – С. 608-617
10. Федотов Л. В. Цифровая радиоинтерферометрическая система преобразования сигналов / Л. В. Федотов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – № 5. – С. 60-66.
11. Hase, H. The Future Global VLBI2010 Network of the IVS / H. Hase [et al.] // Proc of the 20th Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy. – 2011. pp. 78-81. ISSN 1864-1113.
12. Schawlow, A.L. Infrared and Optical Masers / A.L. Schawlow, C.H. Townes // Phys. Rev. – 1958. – № 112. – pp. 1940-1949.

13. Carruthers, T.F. LIGO: Finally Poised to Catch Elusive Gravitational Waves? [Электронный ресурс] / T.F. Carruthers, D.H. Reitze // OPTICS & PHOTONICS NEWS – 2015. - Режим доступа: https://www.osa-opn.org/home/articles/volume_26/march_2015/features/ligo_finally_poised_to_catch_elusive_gravitational/
14. Siegman, A. E. An Introduction to Lasers and Masers / A. E. Siegman // McCraw-Hill, New York. – 1971. – 362 p.
15. Климков, Ю.М. Лазерная техника: Учебное пособие / Ю.М. Климков, М.В. Хорошев. – М.: МИИГАиК. – 2014. – 143 с.
16. Быков, В. Лазерные резонаторы / В. Быков, О. Силичев // М.: Физматлит. – 2004. – 320 с.
17. Коронкевич, В.П. Лазерные интерферометрические и дифракционные системы / В.П. Коронкевич [и др.] // Компьютерная оптика. – 2010. – т. 34. – № 1. – С. 4-23.
18. Современные лазерно-информационные и лазерные технологии: сб. трудов ИПЛИТ РАН / под ред. В.Я. Панченко, В.С. Голубева. – М.: Интерконтакт Наука. – 2005. – 304 с.
19. Коршунов, И.П. Интерферометрические методы для исследования и создания протяженных оптических трактов передачи: дис. ... д-ра физико-математических наук : 01.04.03 / Коршунов Игорь Петрович. – Москва., 1983. – 332 с.
20. Дедловский, М. М. К вопросу о передаче оптического изображения линзовой лучеводной линией / М. М. Дедловский, Е. Л. Ефремов, И. П. Коршунов // Оптика и спектроскопия. – 1977. – т. 43. – № 6. – С. 1170-1172.
21. Григорьянц, В.В. Волоконно-оптические линии связи / В.В. Григорьянц [и др.] // В сб. Проблемы современной радиотехники и электроники, т. 2, Исследования в области электроники и волоконной оптики. – М.: ИРЭ АН СССР. – 1978. —324с.
22. Алешин, В.А. Оптические измерители перемещений и деформаций на основе трехзеркальных лазерных интерферометров / В.А. Алешин, М.Н. Дубров, Л.В. Смеляков // Автометрия, издательство Наука, Новосибирск, – 1985. – С. 101-103.
23. Bosch, T. Optical feedback interferometry for sensing application / T. Bosch, N. Servagent, S. Donati // Opt. Eng. 40. – 2001. N 1, – pp. 20-27.
24. Plantier, G. Behavioral model of a self-mixing laser diode sensor / G. Plantier, C. Bes, T. Dosch // IEEE Journ. Quant. Electron. 41. – 2005. – № 9. – pp.1157-1167.
25. Giuliani, G. Laser diode self-mixing technique for sensing application / G. Giuliani [et al.] // Journ. Opt.: Pure Appl. Opt. – 2002. – № 4. pp. S283-S294.

26. Соболев, В.С. Методы активной интерферометрии с частотной модуляцией / В.С. Соболев, Г.А. Кашеева // Измерительная техника. – 2010. – № 3. – С. 59-64.
27. Столповский, А.А. Двухпучковая спектроскопия биологических объектов. / А.А. Столповский, М.Н. Прокопенко, Т. П. Камынина // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2001. – № 11. – С. 56-65.
28. Букин, В.В. Интерферометрическая диагностика фемтосекундной лазерной микроплазмы в газах / В.В. Букин [и др.] // Труды ИОФАН. – М.: Наука. – 2011. – т. 67 – С. 3-31.
29. Гусев, М.Е. Методы цифровой голографической интерферометрии и их применение для измерения наноперемещений / М.Е. Гусев [и др.] // Наносистемы: физика, химия, математика. – 2011. – т. 2, – № 1. – С. 23-39.
30. Никитин, В.М. Интерферометрические методы подавления аддитивных помех / В.М. Никитин [и др.] // Труды института общей физики им. А.М. Прохорова – 2014. – т. 70, – С. 3-15.
31. Василенко, Ю. Г. Лазерные доплеровские измерители скорости со смещением частоты / Ю. Г. Василенко [и др.] // Автометрия. – 1974. – № 6. – С. 83-87.
32. Долгих, Г. Лазеры. Лазерные системы / Г. Долгих, В. Привалов // Дальнаука. – 2009. 204 с.
33. Gapontsev, V. Diffraction Limited Ultra-High-Power Fiber Lasers / V. Gapontsev [et al.] // Advanced Solid-State Photonics. Optical Society of America. – 2010. P. AWA1. 133
<https://doi.org/10.1364/ASSP.2010.AWA1>
34. Shcherbakov, E. Industrial Grade 100 kW Power CW Fiber Laser [Электронный ресурс] / E. Shcherbakov [et al.] // Advanced Solid State Lasers OSA Technical Digest. - Paper ATh4A. - Режим доступа: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ASSL-2013-ATh4A.2>.
35. Koester, C. J. Amplification in a Fiber Laser / C. J. Koester, E. Snitzer // Applied Optics. - 1964. – V. 3. – pp. 1182-1186.
36. Stone, J. Neodymium-doped fiber lasers: room temperature CW operation with an injection laser pump / J. Stone, C. A. Burrus // Applied Optics. – 1974. – V. 13. – № 6. – pp. 1256-1258.
37. Гапонцев, В. П. Волоконный интерферометр Майкельсона с компенсацией потерь / В. П. Гапонцев [и др.] // Квантовая электроника. – 1991. –т. 18. – № 9. – С. 1137-1139.

38. Балыгина, К.А. Управление распределенной интерференцией в однопроходной системе квантовой криптографии / К.А.Балыгина [и др.] // Письма в ЖЭТФ. – 2017. – т. 106. – № 2. – С. 108-114.
39. Андронова, И.А. Физические проблемы волоконной гироскопии на эффекте Саньяка. / И.А. Андронова, Г.Б. Малыкин // Успехи физических наук. – 2017. – № 8. – С. 849–873.
40. Lapointe, M. Thermal effects in high-power CW fiber lasers / M. Lapointe [et al.] // Proc. SPIE 7195, Fiber Lasers VI: Technology, Systems, and Applications, 71951U.
41. Leich, M. Femtosecond pulse-induced fiber Bragg gratings for in-core temperature measurement in optically pumped Yb-doped silica fibers / M. Leich [et al.] // Optics Communications. – 2012. – Vol. 285. – № 21–22. – pp. 4387-4390.
42. Gainov, V. Temperature measurement of a core of the active optical fiber in lasing regime / V. Gainov, D. Demyankov, O. Ryabushkin // 2007 European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference, – 2007. pp. 2.
43. Рябушкин, О. Резонансная радиочастотная спектроскопия оптических волоконных структур в условиях усиления лазерного излучения / О. Рябушкин, Р. Шайдуллин, И. Зайцев // Успехи современной радиоэлектроники. – 2014. – С. 57-65
44. Котов, О.И. Дистанционный интерферометрический датчик с поляризационным разделением каналов / О. И. Котов [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2000. – т. 26. – № 10. – С. 28 -34.
45. Мамедов, А. М. Интерференционные эффекты при релеевском рассеянии света в одномодовых оптических волокнах: дис. ... канд. физико-математических наук : 01.04.01 / Мамедов, Акиф Маил оглы. – Фрязино. – 2009. – 135 с.
46. Листвин, А. В. Оптические волокна для линий связи / А. В. Листвин, В. Н. Листвин, Д. В. Швырков. // М.: ЛЕСАРарт. – 2003. – 288 с.
47. Евтихеев, Н. Н. Волоконно-оптические преобразователи в системах передачи данных / Н. Н. Евтихеев, Э. А. Засовин, Д. И. Мировицкий // Итоги науки и техн. Сер. Связь. - 1991. - Т. 8. – С. 24-109.
48. Гуляев, Ю. В. Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение / Ю. В. Гуляев, М. Я. Меш, В. В. Проклов // М.: Радио и связь, – 1991. – 152 с.
49. Бусурин, Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения / Ю.Р. Бусурин, М. Носов. // В.И.: Энергоатомиздат. – 1990. – 256 с.
50. Starostin, N. I. Interferometric Fiber-Optic Electric Current Sensor for Industrial Application / N. I. Starostin [et al.] // Key Engineering Materials. – 2010. – vol.437. –pp. 314-318.

51. Takemoto, S. A 100 m laser strainmeter system in the Kamioka Mine, Japan, for precise observations of tidal strains. / S. Takemoto [et al.] // Journal of Geodynamics Volume 41, Issues 1-3. – 2006. – pp. 23-29.
52. Agnew, D. C. Long-Base Laser Strainmeters: A Review / D. C. Agnew, F. K. Wyatt. // Institute of Geophysics and Planetary Physics Scripps Institution of Oceanography University of California, San Diego, Scripps Institution of Oceanography Technical Report, – 2003. 54 p.
53. Долгих, Г.И. Применение лазерных деформографов вертикальной и горизонтальной ориентаций в геофизических исследованиях переходных зон / Г.И. Долгих [и др.] // Физика Земли. – 2002. – № 8. – С. 69-73.
54. Дягилев, Р.А. Особенности вариаций деформаций горных пород в действующем калийном руднике / Р.А. Дягилев, Ю.В. Иванова // Уральская молодежная научная школа по геофизике. Екатеринбург: УрО РАН. – 2000. – С. 8-10.
55. Долгих, Г.И. Исследование волновых полей океана и литосферы лазерно-интерференционными методами / Г.И. Долгих // – Владивосток: Дальнаука. – 2000. – 160 с.
56. Алешин, В. А. Лазерный интерферометр для измерения деформаций земной коры / В. А. Алешин, М. Н. Дубров, А. П. Яковлев // ДАН СССР. — 1980. — т. 256. — № 6. — С. 1343-1346.
57. Алешин, В.А. Лазерный деформограф на геодинамическом полигоне в Таджикистане / Алешин В.А. [и др.] // Радиотехника и электроника. – 1980. – т. 25. – № 8. – С. 1781-1784.
58. Корчагин, Ф. Г. Исследование собственных колебаний Земли с помощью оптического деформографа / Ф. Г. Корчагин [и др.] // Тихоокеанская геология. –1986. – № 5. – С. 110-112.
59. Долгих, Г.И. Сейсмоакустико-гидрофизический комплекс для мониторинга системы «Атмосфера – Гидросфера – Литосфера» / Г.И. Долгих [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2002. – № 3. – С. 120-122.
60. Иванова, Ю.В. Изучение микросейсмических шумов в калийном руднике / Ю.В. Иванова // Геодинамика и геологические изменения в окружающей среде северных регионов: Материалы Всероссийской конференции с международным участием: Т. I. Архангельск: Институт экологических проблем севера УрО РАН. – 2004. – С. 341-344.
61. Бутырин, П.Г. Использование цифровой системы регистрации при установке лазерного деформографа на территории ВКМКС / П.Г. Бутырин, Ф.Г. Верхоланцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Материалы ежегодной научной сессии

Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2004 году. Пермь: ГИ УрО РАН. – 2005. – С. 159-160.

62. Долгих, Г.И. Результаты испытаний лазерного деформографа, установленного в забайкалье / Г.И. Долгих [и др.] // Геология и геофизика. –2016. – т. 57. – № 12. – С. 2240-2249.

63. Милюков, В.К. Лазерный интерферометр-деформограф для мониторинга движений земной коры. / В.К.Милюков [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2005. – № 6. –С. 87-103.

64. Милюков, В. К. Наблюдения спектра деформаций земли лазерным интерферометром-деформографом / В. К. Милюков, В. К. Кравчук // Вестник Моск. Ун-та. Сер. 3, физика. Астрономия. – 1996. – №2. – С. 73-78.

65. Дубров, М.Н. Проведение испытаний мобильного лазерного деформографа на морской экспедиционной станции м. Шульца / М.Н. Дубров, Д.В. Александров // Пятый Всероссийский симпозиум «Физика геосфер». Материалы докладов. Владивосток. – 2007. – С. 65-70.

66. Александров, Д.В. Результаты измерений деформаций Земной поверхности с помощью лазерных интерферометров / Д.В. Александров, М.Н. Дубров // Вестник СПбО АИН № 3- 5. – 2009. – С. 105-113.

67. Долгих, Г.И. Лазерная физика. Фундаментальные и прикладные исследования / Г.И. Долгих, В.Е. Привалов // – Владивосток: Дальнаука. – 2016. 352 с. ISBN 978-5-91849-116.

68. Криницын, Ю. М. Модуляционные методы стабилизации частоты лазерного излучения и регистрации сигнала интерферометров: дис. ... канд. физико-математических наук : 01.04.05 / Криницын, Юрий Михайлович. – Хабаровск. – 1996.

69. Горелик, Г. С. Исследование колебаний, весьма малых по сравнению с длиной световой волны, посредством гармонического анализа модулированной интерференционной картины / Г. С. Горелик // ДАН СССР. – 1952. – т. 83. – № 4. – С. 553-556.

70. Берштейн, И. Л. К обзору "Модуляционная интерферометрия" / И. Л. Берштейн // УФН. – 1953. – т. 49. – № 4. – С. 631-633.

71. Нерсесов, И.Л. Деформационные процессы в период, предшествующий Спитакскому землетрясению / И.Л. Нерсесов, Л.А. Латынина // АН СССР, ИФЗ, М. – 1989. 93 с.

72. Bock, Y. Detection of Crustal Deformation from the Landers Earthquake Sequence Using Continuous Geodetic Measurements / Y. Bock [et al.] // Nature. – 1993. – № 361. pp. 337-340.
73. Hurst, K.J The coseismic geodetic signature of the 1999 Hector Mine earthquake / K.J. Hurst [et al.] // G.R.L. – 2000. – v. 27. – № 17. pp. 2733-2736.
74. Левин, В.Е. Предварительные результаты GPS мониторинга на Камчатке и Командорских островах. / В.Е. Левин [и др.] // Вулканология и сейсмология. – 2002. – № 1. С. 3-11.
75. Мищенко, М. А. Мониторинг геоакустической эмиссии осадочных пород при помощи лазерного деформографа-интерферометра и трёхкомпонентного пьезоэлектрического сейсмоприёмника / М. А. Мищенко [и др.] // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2017. – № 4(20). – С. 83-90.
76. Дубров, М.Н. О связи высокочастотных микросейсмических деформаций с напряженным состоянием литосферы / М.Н. Дубров, А.П. Яковлев, В.А. Алешин // ДАН СССР. – 1987. – т. 293. – № 5. – С. 1085-1089.
77. Алешин, В. А. Лазерный деформограф штольневого типа / В. А. Алешин, М. Н. Дубров, А. П. Яковлев // Физика Земли. –1993. – № 4. – С. 62-68.
78. Дубров, М.Н. Наблюдение сверхдлиннопериодных деформационных колебаний земной поверхности, связанных с малыми вариациями атмосферного давления / М.Н. Дубров [и др.] // Физика Земли. – 1998. – № 12. – С. 22-30.
79. Дубров, М.Н. Взаимосвязанные возмущения земной поверхности, атмосферы и ионосферы Земли / М.Н. Дубров, В.М. Смирнов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2013. – т.53. – № 1. – С. 53-63.
80. Авербах, В. С. Методы селекции типов колебаний в открытых квазиоптических системах / В. С. Авербах, С.Н. Власов, В. И. Таланов // Радиофизика. – 1967. – т. 10. – С. 1333-1357.
81. Сикора, С. В. Активный лазерный интерферометр / С. В. Сикора, Г. С. Симкин // Труды Харьковского государственного НИИ метрологии. М. – 1969. – С. 104-114.
82. Brannon, P. J. Laser feedback: its effect on laser frequency / P. J. Brannon // Appl. Opt., – 1976. – № 15. – pp. 1119-1120.
83. Дмитриев, А. К. Сдвиги частоты стабилизированного лазера из-за отражения излучения от внерезонаторных оптических элементов / А. К. Дмитриев, А. С. Дычков, А. А. Луговой // Квантовая электроника. – 2005. – т. 35. – С. 285-289.

84. Дубров, М.Н. Применение лазерных интерферометров-деформографов в метрологии больших длин / М.Н. Дубров, М.Т. Прилепин, В.А. Алешин // Измерительная техника. – 1990. – № 5. – С. 17-19.
85. Donati, S. Speckle Pattern Errors in Self-Mixing Interferom / S. Donati, G. Martini, T. Tambosso // IEEE J. Quantum Electron. – 2013. – v. 49. – pp. 798-806.
86. Каценеленбаум Б. З. Высокочастотная электродинамика / Б.З. Каценеленбаум – М.: Наука, 1966. – 237 с.
87. Войтович, Н.Н. Электродинамика антенн с полупрозрачными поверхностями. Методы конструктивного синтеза / Н.Н. Войтович [и др.]; под ред. Каценеленбаума Б. З., Сивова А.Н. // М.: Наука. – 1989. 176 с.
88. Градштейн, И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик – М.: Наука, 1971. – 1108 с.
89. Дубров, М.Н. Затыгивание частоты высокостабильных лазеров отраженным и рассеянным излучением / М.Н. Дубров, В.А.Алешин, В.П. Мальцев // Препринт №17 (549), ИРЭ АН СССР, М. – 1990. – 31 с.
90. Wyatt, F. K. Long-Base Laser Strainmeters: A Review / F. K. Wyatt // Scripps Institution of Oceanography Technical Report, – 2003. 54 p.
91. Разработка и создание лабораторного образца пространственно-разнесенной системы геофизического мониторинга сейсмодиформационных волновых полей: отчет о НИР / Луканенков А.В. – РФФИ 06-05-08059, 2006.
92. Дубров, М.Н. Высокоточные лазерные интерферометры в многокомпонентных измерительных системах [Электронный ресурс] / М.Н.Дубров, В.А. Алешин // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал ИРЭ РАН). – 2000. – N 10. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct00/4/text.html>.
93. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф // М.: Наука, 1970. – 855 с.
94. Кирьянов, В.П. Лазерная нанointерферометрия перемещений: методы и средства повышения точности измерений / В.П. Кирьянов // Известия Академии наук, Серия физическая. – 1999, – т.63. – N 6. – С. 1110-1116.
95. Dubrov, M.N. Accurate laser interferometer system for displacement measurements with 1 pm resolution / M.N. Dubrov, P.V. Medvedev // 2008 4th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers. – 2008. – P. 165-167.
96. Amoruso, A. The geodetic laser interferometers at Gran Sasso, Italy: recent modifications and correction for local effects / A. Amoruso, L. Crescentini // Journal of Geodynamics. – 2009. – V. 48, – P. 120-125.

97. Марапулец, Ю.В. Отклик геоакустической эмиссии на активизацию деформационных процессов при подготовке землетрясений / Ю.В. Марапулец [и др.] // Тихоокеанская Геология. – 2012. – т. 31, – С. 59-67.

98. Лабораторные оптические приборы: Учебное пособие для приборостроительных и машиностроительных вузов / Г.И.Федотов, Р.С.Ильин, Л.А.Новицкий, В.Е.Зубарев, А.С. Гоменюк; под ред. Л.А. Новицкого – 2 изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – 448 с.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

Статьи в журналах из рекомендованного перечня ВАК РФ

1. Александров, Д.В. Исследование стабилизированных лазеров с автоподстройкой частоты / Д.В. Александров, М.С. Ремонтов // Нелинейный мир. – 2007. – т. 5. – № 5. – С. 299-300.
2. Александров, Д.В. Разработка методов исследования свойств наноматериалов с использованием лазерных интерферометров и компьютерной обработки данных / Д.В. Александров // Перспективные материалы. – 2010. – № 9. – С. 9-11.
3. Александров, Д.В. Разработка методов исследования наноматериалов с использованием лазерных интерферометров и компьютерной обработки данных / Д.В. Александров, М.С. Ремонтов // Нелинейный мир. – 2011. – т. 9. – № 1. – С. 11-12.
4. Александров, Д.В. Разработка методов исследования наноматериалов с использованием лазерных интерферометров и компьютерной обработки данных / Д.В. Александров, М.С. Ремонтов // Нанотехнологии: разработка, применение - XXI век. – 2012. – т. 4. – № 4. – С. 40-41.
5. Александров, Д.В. Особенности работы трехзеркального интерферометра и использование его для регистрации деформаций земной поверхности / Д.В. Александров // Нелинейный мир. – 2012. – т. 10. – № 2. – С. 114-115.
6. Александров, Д.В. Комплексный спектральный анализ данных лазерной интерферометрической решетки / Д.В. Александров, В.В. Кравцов // Нелинейный мир. – 2013. – т. 11. – № 2. – С. 110-111.
7. Александров, Д.В. Изучение работы управляемых лазер-интерферометров на больших базах / Д.В. Александров, М.Н. Дубров, В.В. Кравцов // Нелинейный мир. – 2015. – т. 13. – № 2. – С. 5-6.
8. Александров, Д.В. Разработка и апробация методов линеаризации данных лазерного интерферометра-деформографа / Д.В. Александров, М.Н. Дубров, В.В. Кравцов // Нелинейный мир. – 2016. – т. 14. – № 1. – С. 6-8.
9. Александров, Д.В. Результаты испытаний трехзеркального лазерного интерферометра на Камчатском геополигоне / Д.В. Александров, М.Н. Дубров, В.В. Кравцов // Нелинейный мир. – 2017. – т. 15. – № 2. – С. 67-70.
10. Александров, Д.В. Результаты испытаний лазерных интерферометров-деформографов на Фрязинском Лучеводном полигоне / Д.В. Александров, М.Н. Дубров, В.В. Кравцов // Нелинейный мир. – 2018. – т. 16. – № 2. – С. 44-46.

В том числе в журналах, входящих в систему цитирования Web of Science, Scopus и Springer:

11. Александров, Д.В. Особенности работы высокостабильных лазеров при подключении несогласованной оптической нагрузки / Д.В. Александров, М.Н. Дубров, А.Д. Шатров // Радиотехника и электроника. – 2011. – т. 56. – № 9. – С. 1149.
12. Шатров, А. Д. Исследование электродинамической системы, состоящей из лазерного резонатора и внешнего слабо отражающего элемента / А. Д. Шатров,

М. Н. Дубров, Д. В. Александров // Квантовая электроника. – 2016. – т. 46. – № 12. – С. 1159–1162.

13. Дубров, М. Н. Генерация связанных мод в несогласованном трехзеркальном лазерном резонаторе / М. Н. Дубров, Д. В. Александров // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2018. – т. 107. – № 5-6. – С. 353-359.

Список публикаций в других изданиях:

14. Александров, Д.В. Результаты измерений деформаций Земной поверхности с помощью лазерных интерферометров / Д.В. Александров, М.Н. Дубров // Вестник СПбО АИН № 3-5. – 2009. – С. 105-113.

15. Дубров, М.Н. Лазерные интерферометры-деформографы: новые разработки и применение / М.Н. Дубров, Д.В.Александров, В.В. Кравцов // Исследовано в России. – 2013. – № 25. – С. 354.

Список публикаций в трудах конференций:

16. Александров, Д.В. Исследование лазерного резонатора при подключении несогласованной нагрузки / Д.В. Александров, М.С. Ремонтов // Тезисы докладов 49 научной конференции МФТИ. – 2006г. – С. 57-58.

17. Александров, Д.В. Линеаризация и спектрально-временной анализ данных лазерного деформографа / Д.В. Александров, М.С. Ремонтов // материалы докладов Пятый Всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток. – 2007. – С. 231-235.

18. Дубров, М.Н. Проведение испытаний мобильного лазерного деформографа на морской экспедиционной станции м. Шульца / М.Н. Дубров, Д.В. Александров // материалы докладов Пятый Всероссийский симпозиум «Физика геосфер», Владивосток. – 2007. –С. 65-70.

19. Dubrov, M.N. Laser interferometer antenna array records seismo-acoustic earth strains / M.N.Dubrov, D.V. Aleksandrov // В сборнике: 2007 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques, ICATT'07 Sevastopol. – 2007. – pp. 307-308.

20. Александров, Д.В. Результаты измерений деформаций земной поверхности с помощью лазерных интерферометров. Лазеры. Измерения. Информация / Д.В. Александров, М.Н. Дубров // Труды конференции. Санкт-Петербург. – 2009. – С. 54.

21. Александров, Д.В. Разработка методов исследования свойств наноматериалов с использованием лазерных интерферометров и компьютерной обработки данных / Д.В. Александров // VI Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов, Москва ИМЕТ РАН. – 2009. - С. 39-40.

22. Александров, Д.В. Исследование двухволнового термоуправляемого He-Ne лазера в схеме трехзеркального интерферометра / Д.В. Александров, М.Н. Дубров, М.С. Ремонтов // Конференция "ЛАЗЕРЫ. ИЗМЕРЕНИЯ. ИНФОРМАЦИЯ - 2010", Санкт-Петербург. – 2010. – С. 35-36.

23. Александров, Д.В. Применение лазерных интерферометров-деформографов для регистрации геофизических процессов в акустическом диапазоне частот / Д.В. Александров, М.Н. Дубров, И.А. Ларионов // В сборнике: Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений Сборник докладов V международной конференции. – 2010. – С. 312-315.

24. Aleksandrov, D.V. Application of three-mirror laser resonator in two-wavelength interferometer scheme / D.V. Aleksandrov, M.N. Dubrov, M.S. Remontov // В сборнике: Conference Proceedings - 11th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, LFNМ 2011. – 2011. – pp. 6144996.
25. Александров, Д.В. Предварительные результаты испытаний трехзеркального лазерного интерферометра на Камчатском геополигоне / Д.В. Александров, В.В. Кравцов, И.А. Ларионов // Конференция «Лазеры. Измерения. Информация-2013», Санкт-Петербург. – 2013. – С. 72-73.
26. Дубров, М.Н. Разработка элементов и испытание лазерно-интерферометрической решетки для обнаружения опасных геофизических процессов / М.Н. Дубров, Д.В. Александров, В.В. Кравцов // XI Международная конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии» Абрау-Дюрсо. – 2013. – С. 29.
27. Александров, Д.В. Обработка лазерно-интерферометрической информации в прецизионных измерительных устройствах / Д.В. Александров, М.Н. Дубров, В.В. Кравцов // Конференция «Лазеры. Измерения. Информация-2014», Санкт-Петербург, – 2014. – С. 32-33.
28. Дубров, М.Н. Изучение работы управляемых лазер-интерферометров на больших базах / М.Н. Дубров, Д.В. Александров, В.В. Кравцов // XII Международная конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии» Абрау-Дюрсо. – 2014. – С. 95-96.
29. Александров, Д.В. Разработка методов исследования физических характеристик наноматериалов с использованием лазерных интерферометров / Д.В. Александров, М.Н. Дубров, В.В. Кравцов, М.С. Ремонтов // Новые материалы, Сборник материалов. – 2016. – С. 236-238.
30. Александров, Д.В. Результаты испытаний трехзеркального лазерного интерферометра на Камчатском геополигоне / Д.В. Александров [и др.] // Сборник тезисов докладов VII международной конференции, Петропавловск-Камчатский. – 2016. – С. 92-93.
31. Александров, Д.В. Результаты испытаний трехзеркального лазерного интерферометра на Камчатском геополигоне / Д.В. Александров, М.Н. Дубров, И.А. Ларионов // Доклады VII Международной конференции "Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений", Паратунка, Камчатский край, Россия. – 2016. – С. 322-325.
32. Александров, Д.В. Сейсмо-деформационный и акустический мониторинг геодинамических процессов высокочувствительными пространственно разнесенными приборами в сейсмоэнергoактивной и асейсмической зонах / Д.В. Александров [и др.] // Сборник тезисов докладов VII международной конференции, Петропавловск-Камчатский. – 2016. – С. 72-73.
33. Александров, Д.В. Сейсмо-деформационный и акустический мониторинг геодинамических процессов высокочувствительными пространственно разнесенными приборами в сейсмоэнергoактивной и асейсмической зонах / Д.В. Александров [и др.] // Доклады VII Международной конференции "Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений", Паратунка, Камчатский край, Россия. – 2016. – С. 246-249.