

3.1 **Номер Проекта**
17-07-00872.

3.2 **Название Проекта**
Разработка и исследование методов повышения чувствительности инфранизкочастотной акустооптической технологии дальней регистрации акустических колебаний с применением прецизионных вибрационных источников и лазерных измерительных линий.

3.3 **Коды классификатора, соответствующие содержанию фактически проделанной работы (в порядке значимости)**
07-166 Лазерно-информационные технологии
07-215 Анализ и моделирование прикладных распределенных разработок

3.4 **Цель и задачи фундаментального исследования**

1. Проведение теоретических и экспериментальных исследований новых оптических методов повышения чувствительности акустооптического взаимодействия на инфранизких частотах, основанных на анализе: изменений временных и энергетических характеристик синхронных оптических потоков импульсов на поперечных трассах распространения инфразвука от внешних промышленных источников, техногенных и транспортных шумов.

С этой целью необходимы:

- проведение акустооптических измерений;
- создание и практическая реализация фазо-частотного метода одновременной обработки оптических и акустических колебаний для определения времен вступлений волн из атмосферы;
- проведение статистического анализа атмосферных и техногенных помех. Накопление статистики помех.

2. Анализ и проведение экспериментальных работ по изучению корреляционной зависимости параметров молекулярного рассеяния ультрафиолетовых импульсов от функции концентрации молекул в инфразвуковой волне.

3. Подготовка программно-аппаратного комплекса и проведение экспериментальных исследований на лазерном полигоне «Кайтанак» (горный Алтай) с целью оценивания параметров акустооптического преобразования на инфранизких частотах.

4. Определение благоприятных условий дифракции светового луча в инфразвуковом поле за счет выбора параметров лазерного излучения, учета внешних атмосферных условий, использования акустических источников активного зондирования атмосферы на инфранизких частотах.

5. Уточнение и обобщение теории акустооптического преобразования в области инфразвуковых частот.

6. Обобщение материалов исследований, подготовка научных статей.

7. Составление итогового отчета.

3.5. Важнейшие результаты, полученные при реализации Проекта.

В основе рассматриваемого типа акустооптического взаимодействия лежат процессы, связанные с волновым возмущением лазерных световых колебаний внешним акустическим полем, сквозь которое в атмосфере распространяется световой луч. Возмущенная атмосфера в локальных точках пространства обуславливает изменение параметров распространения

лазерного излучения, включая его характеристики преломления, поглощения и рассеяния. Следствием этого могут быть вариации амплитудных уровней и скоростей распространения измерительных волн, их фазо-частотные преобразования, определяющие возможности «лучевого приема» акустических колебаний. Проводимые исследования связаны со следующей постановкой задачи: рассматривается взаимодействие волновых колебаний разной природы – акустический волновой процесс

$$\nabla^2 x - \frac{1}{v^2} \frac{d^2 x}{dt^2} = 0 \quad (1)$$

и процесс в измерительном луче

$$\nabla^2 y - \frac{1}{c^2} \frac{d^2 y}{dt^2} = 0 \quad (2)$$

где v, c – скорости распространения акустической и измерительных волн соответственно, ∇^2 – оператор Лапласа. Уравнение (1) допускает решение в виде плоской гармонической волны с амплитудой A : $x(t) = A \sin(\omega t - \bar{k} \bar{r})$, где \bar{r} – радиус-вектор, \bar{k} – волновой вектор, причем $|\bar{k}| = k = \omega/v$.

Взаимодействие обоих волновых процессов основывается на том, что акустический волновой фронт, характеризуемый в точках среды значениями акустических давлений, обуславливает возникновение в среде механических деформаций a_j . Вследствие этого каждая акустическая волна сопровождается изменением показателя преломления среды n . С учетом этого для плоской монохроматической акустической волны, распространяющейся вдоль заданного направления z , меняющийся показатель преломления может быть представлен в виде

$$n(z, t) = n + \Delta n \cos(2\pi f t - k z) \quad (3)$$

Здесь n – невозмущенный показатель преломления, f и k – частота и волновое число, Δn – амплитуда изменения показателя преломления под действием акустической волны. Для падающего света среда с показателем преломления (3) представляет собой дифракционную решетку, движущуюся со скоростью звука v . Проходя через такую среду, свет дифрагирует на неоднородностях показателя преломления в зависимости от частоты колебаний акустической волны. Условия осуществимости лучевого приема, основанные на соотношениях параметров внешнего акустического поля и измерительных колебаний, определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} v/\omega \gg c_0/v, \quad L/rl \gg 1, \quad \lambda/d > 0.82 \\ L/\lambda \ll \begin{cases} c_0^2/c_m v & \text{при } c_0/v \gg 1 \\ c_0^2/c_m v, \quad c_0/(v-c_0) & \text{при } c_0/v < 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь V, c_0, c_m – угловая частота, средняя скорость и амплитуда параметрического изменения скорости распространения колебаний в измерительном луче; L, d – длина и диаметр измерительного луча; ω, λ, v – угловая частота, длина волны и скорость распространения внешних акустических колебаний; rl – радиус пространственной корреляции неоднородностей среды.

Приведенные соотношения определяют требования к выбору условий регистрации акустических колебаний с помощью лазерной измерительной линии. В реальных условиях на процессы регистрации влияют ряд факторов: неоднородность атмосферы, внешние шумы и освещенность и др. Полнота учета всех внешних факторов достигается в условиях проведения экспериментальных исследований.

Полученные в связи с решением рассматриваемой задачи *основные результаты* состоят в следующем.

Результаты разработки и реализации новых методов и аппаратуры для повышения чувствительности акустооптического преобразования на инфранизких частотах.

С этой целью были разработаны и исследованы

1. Макет стационарной комбинированной акустооптической системы (АОС), включающей в себя мощный вибрационный источник сейсмоакустических колебаний, оптический измерительный стенд и полевые станции для регистрации исходных сейсмических и акустических колебаний.
2. Высокочувствительный амплитудно-фазо-частотный метод одновременной обработки оптических и акустических колебаний для определения параметров сейсмо-акусто-оптических колебаний нанометрового уровня на фоне многократно превосходящих шумов.
3. Результаты высокочувствительных акустооптических измерений на инфранизких частотах. Экспериментально полученные оценки помехоустойчивости параметров акустооптического преобразования в условиях применения комбинированной АОС и данной помеховой обстановки.
4. Двухлучевая лазерная измерительная линии для изучения акустооптических взаимодействий на инфранизких частотах.
5. Аналитические оценки метода мониторинга сейсмоакустических и инфразвуковых волн на атмосферных линиях с высокостабильным лазерным излучением.
6. Лазерно-волоконный стенд на обсерватории «Кайтанак» (республика Горный Алтай) и его экспериментальные характеристики.
7. Метод обнаружения инфразвука в атмосфере на основе корреляции параметров молекулярного рассеяния ультрафиолетовых импульсов с изменением концентрации молекул в инфразвуковой волне.

Подробное описание приведенных результатов дается ниже.

1. Макет стационарной комбинированной акустооптической системы

Для проведения исследований авторами создан макет акусто-оптической информационной системы (Рис.1) в составе сейсмического вибратора ЦВ-40 (акустического излучателя), оптического стенда в составе лазерного излучателя, оптического приемника. На представленных схемах вибратор ЦВ-40 играет роль внешнего низкочастотного генератора акустических колебаний, распространяющихся в атмосфере в диапазоне частот 6.25-11.23 Гц. Метеостанция предназначена для регистрации метеоусловий в окружающей атмосфере.

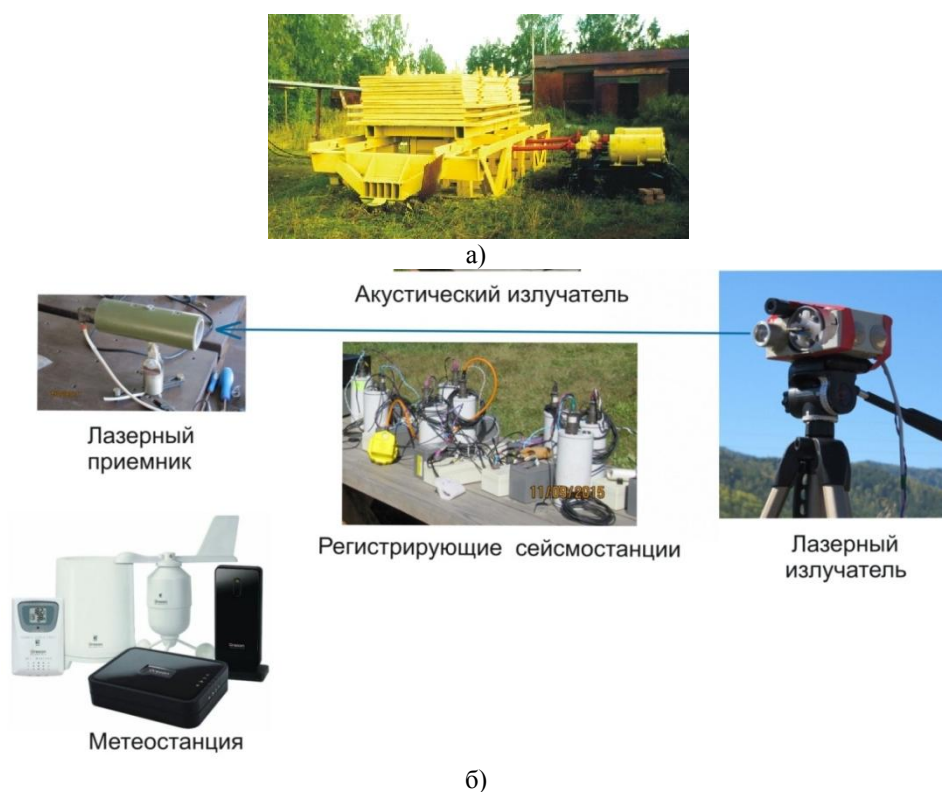


Рис.1 Компоненты акустооптической системы: а)-сейсмический вибратор ЦВ-40; б) акусто-оптический стенд

Для прямой регистрации акустических колебаний используются автономные регистрирующие цифровые станции, располагаемые вдоль измерительного луча. Станции ведут одновременную регистрацию акустического и сейсмического колебаний с возможностями хранения данных, а также удаленной передачи их по каналам Интернет и 3G каналам сотовой связи в центр сбора, хранения и обработки данных. На рис.2 приводится общий вид станции. В качестве основных элементов здесь представлены 6-канальная станция «Байкал-8», ко входу которой подключены последовательно соединенные акустические и сейсмические датчики с предварительными усилителями, к выходу – маршрутизатор с модемом для цифровой передачи данных по каналам связи через Wi-Fi или сотовой связи. К выходу каналов связи дистанционно подключена рабочая станция. На экране компьютера рабочей станции представлены результаты обработки данных с целью выделения сейсмических волн – волн первых вступлений, и акустических волн вторых вступлений (см. рис.2). Схема оптического стенда представлена на рис.3.

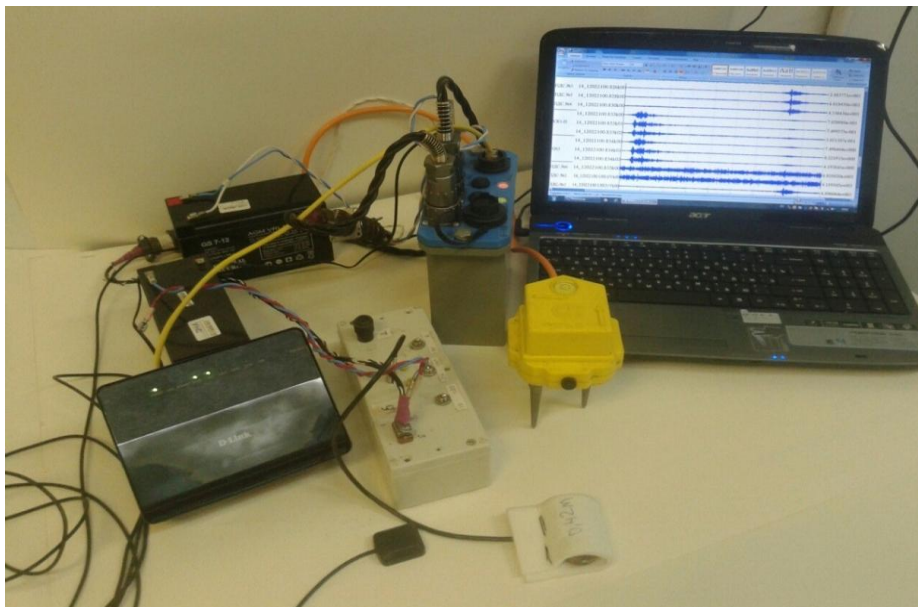


Рис.2. Автономная регистрирующая цифровая станция

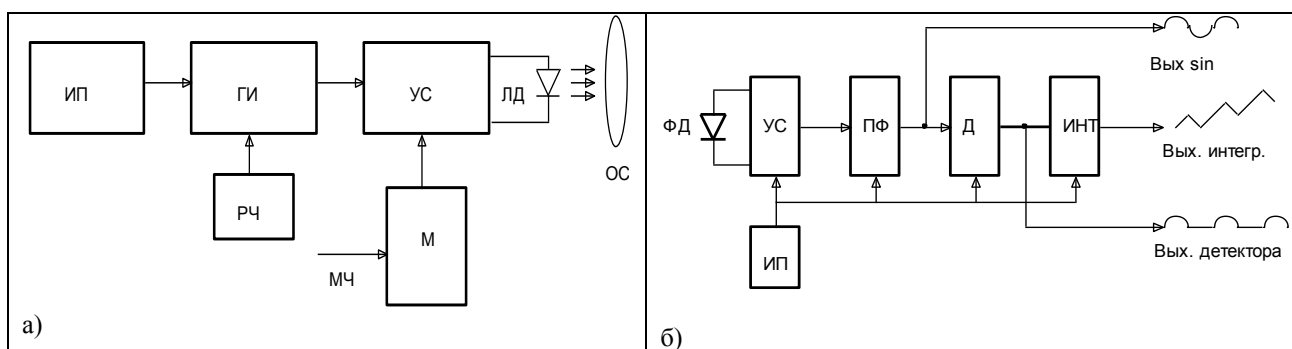


Рис.3. Схема оптического стенда: а) функциональная схема модуля излучателя оптических импульсов; б) функциональная схема оптического приемника. Здесь ИП – источник питания, ГИ – генератор импульсов, РЧ – регулятор частоты, УС – усилитель, М – модулятор, МЧ – модулирующая частота, ЛД – лазерный полупроводниковый детектор, ОС – оптическая система, ФД – фазовый детектор, ПФ – полосовой фильтр, Д – детектор, ИНТ – интегратор.

Роль оптического стенда состоит в формировании импульсов накачки длительностью 50 мкс с частотой следования 1-10 кгц с помощью генератора импульсов (ГИ) и модуля регулировки частоты (РЧ), передачи-приема их по оптической линии связи с последующим выделением огибающей импульсов с применением интегратора (ИНТ), как это показано на рис.3. Кратко принцип работы стенда состоит в следующем. Прямоугольные импульсы длительностью 10 мкс формируются генератором импульсов ГИ со стабильностью по длительности не хуже 3%. Частота следования импульсов определяется модулем регулировки частоты РЧ. Выходной сигнал ГИ усиливается по току блоком УС и подается на лазерный диод ЛД. Выходной оптический сигнал поступает на оптическую систему УС. Модулятор М работает в режиме

повторителя модулирующего входного низкочастотного сигнала (МЧ) и управляет выходным током усилителя, питающего ЛД. Рабочая точка на вольт-амперной характеристике (ВАХ) ЛД выбирается в линейной области. В качестве ГИ используется универсальный генератор DG – 1011 RiGOL, формирующий, как поток импульсов на частоте $f_{\text{нес}}$, так и модулирующий сигнал на частотах $f_{\text{мод}}$. Функциональная схема приемника и демодулятора оптического сигнала приведена на рис.3б. Здесь ФД – фазовый детектор, ПФ – полосовой фильтр, Д – детектор, ИНТ – интегратор. Первый каскад усиления оптического сигнала (УС) выполнен по стандартной схеме с коэффициентом усиления, определяемым отношением сопротивлений в цепи обратной связи. Второй каскад (ПФ) является полосовым активным RC фильтром второго порядка с добротностью $Q=10$. В модуле Д реализован прецизионный детектор, выделяющий огибающую несущей частоты. Модуляционная составляющая несущей частоты интегрируется каскадом интегратора ИНТ, на выходе которого имеем изменение постоянной составляющей, практически пропорционально изменению амплитуды огибающей.

Испытания стенда проводились в условиях лаборатории и открытой атмосферы с использованием отражателей. Результаты передачи АМ модулированных сигналов в диапазоне 2-20 Гц представлены на Рис.4,5. Здесь представлены осциллограммы переданных АМ сигналов и принятых демодулированных сигналов. Выделяемая огибающая несет в себе информацию о внешних акустических воздействиях.

В экспериментах выполнено оценивание предельно низкого уровня глубины амплитудной модуляции измерительного луча, характеризующего чувствительность акустооптического взаимодействия. Идея измерений в лабораторных условиях основывается на принципах амплитудной модуляции (АМ) импульсов накачки лазерного излучения до задаваемой глубины модуляции от модулятора М прецизионными гармоническими сигналами в диапазоне частот 2-20 Гц (рис.2а) с последующей передачей-приемом по оптической линии длиной 80 м. В частности, примеры осциллограмм передачи АМ модулированных сигналов и приема демодулированных, представлены на рис.4,5. В верхней части приведенных рисунков представлены искомые оптические сигналы, в нижней – их огибающие, полученные с выхода интегратора (ИНТ) – рис.3б. Рис.4 соответствует случаю «передачи-приема» в условиях лаборатории на трассе протяженностью 80 м и глубине модуляции 5.1%, Рис.5 – «передаче-приему» по атмосферной трассе при глубине модуляции 10%.

2. *Высокочувствительный амплитудно-фазо-частотный метод одновременной обработки оптических и акустических колебаний для определения параметров сейсмо-акусто-оптических колебаний нанометрового уровня на фоне многократно превосходящих шумов.*

Очевидно, предельные чувствительности в условиях воздействия шумов можно достигать за счет применения цифровых методов обработки огибающей оптического сигнала. Пример записи такого сигнала представлен на рис.4. Выходной оптический сигнал представлен в виде последовательности импульсов накачки с частотой следования 1 кГц и длительностью одиночного импульса 50 мкс. Огибающая сигнала представлена в виде красной линии. Выделение огибающей выполняется последовательно двумя этапами – преобразованием выходных данных с оптического приемника, представленных в формате WAV, в то время как алгоритмы обработки в рабочей станции (рис.2) ориентированы на форматы PC и CSV.

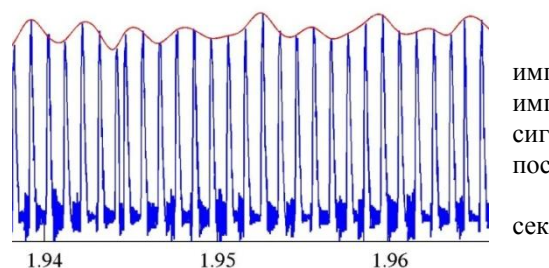


Рис.4 Запись оптического сигнала в виде последовательности импульсов с частотой следования 1 кГц и длительностью одиночного импульса 50 мкс. Сигнал модулирован по амплитуде акустическим сигналом и внешним шумом. Красной линией показана огибающая последовательности импульсов.

Преобразование форматов WAV→PC осуществляется с помощью созданного авторами пакета SeismoDetector. Для преобразования PC→CSV и WAV→CSV были написаны утилиты-конверторы. Созданные программы позволяют в едином комплексе анализировать акустические и оптические данные. Выделение огибающей оптических сигналов основано на скользящем

определении множества амплитуд импульсов и последующей интерполяции их с помощью кубических сплайнов. Исходными данными для модуля выделения огибающей оптических сигналов (рис.4) является период следования импульсов T и время задания первого импульса t_0 . Следующим этапом работы программы является равномерная дискретизация огибающей с частотой 4000 Гц и получение нового множества значений с равномерным шагом. На этом множестве реализуются программы квадратурной обработки и спектрального анализа оптических сигналов. В основе программы квадратурной обработки лежит оценивание амплитуд и фаз модулирующих гармонических сигналов.

К числу цифровых методов обработки оптических данных в связи анализом акустооптического взаимодействия относятся алгоритмы квадратурного измерения амплитуд и фаз гармонических колебаний вида $f(t) = A_{i\max} \sin(\omega_{0i}t + \varphi_{0i}) + n(t)$, $i = 1 \dots M$, где $A_{i\max}$, ω_{0i} и φ_{0i} – амплитуды, частоты и начальные фазы сигналов, $n(t)$ – шум с нормальным распределением. Искомые параметры на интервале задания колебания T определяются с помощью рекуррентного квадратурного алгоритма путем оценивания установившихся значений статистик вида $R[n]$, $\varphi[n]$:

$$R[n] = \sqrt{X[n]^2 + Y[n]^2}, \quad \varphi[n] = \arctg \frac{Y[n]}{X[n]}$$

$$\bar{X}[n] = \bar{X}[n-1] + \gamma(Z_x[n] - \bar{X}[n-1])$$

$$\bar{Y}[n] = \bar{Y}[n-1] + \gamma(Z_y[n] - \bar{Y}[n-1])$$

$$\gamma = \frac{\Delta t}{T}, \quad Z_x = f(t) \cdot \sin \omega_0 t, \quad Z_y = f(t) \cdot \cos \omega_0 t$$

Здесь γ – параметр сходимости алгоритма, Δt – интервал дискретизации колебания $f(t)$.

С помощью алгоритма (5) для случая использования внешнего модулирующего колебания с заданной частотой f_0 и глубиной модуляции M вычисляются текущие оценки амплитуд и фаз огибающей оптического сигнала (рис.3) на каждом отсчете $i = 1 \dots N$ в пределах интервала анализа T .

Экспериментально полученные записи акустических и оптических сигналов и шумов и результаты их анализа методами квадратурной обработки и спектрального анализа.

С помощью приведенных алгоритмов обработаны те же самые данные, что были использованы в получении результатов на рис.4,5. Для случая использования внешнего модулирующего колебания с частотой 5 Гц с глубиной модуляции 0.4% на рис.6а и 6б соответственно получены текущие значения оценок амплитуд и фаз огибающей оптического сигнала на каждом шаге m_i , $i = 1 \dots N$, где N – множество дискретных отсчетов огибающей, укладываемых на временном интервале анализа T . В рассматриваемом случае $T = 60$ с. Количественные значения шагов представлены на оси абсцисс. Конечные результаты оценивания амплитуд и фаз определяются их установившимися значениями начиная с некоторой итерации $m_{уст}$. Аналогичные результаты для глубины модуляции 16% и частоты 10 Гц представлены соответственно на рис.7а,б,с. На рис.6с и рис.7с для рассматриваемых случаев представлены результаты спектрального выделения модулирующего сигнала на фоне шумов.

В проведенных тестовых экспериментах показано, что наиболее чувствительными к акустооптическому взаимодействию является *фаза-частотные характеристики*, позволяющие обеспечить достижимость определения в оптическом сигнале глубины модуляции до уровня в 0.1% или вариации уровней входного акустического сигнала 0.001 и ниже. Следует отметить появление второй гармоники на 20 Гц от 10 Гц модулирующей частоты, что характеризует возможности развития акустооптического взаимодействия на гармониках модулирующей частоты.

Как следует из результатов полученных экспериментов, методы цифровой обработки позволяют многократно (на порядок и более) повысить помехоустойчивость и точность оценивания параметров акустооптического преобразования.

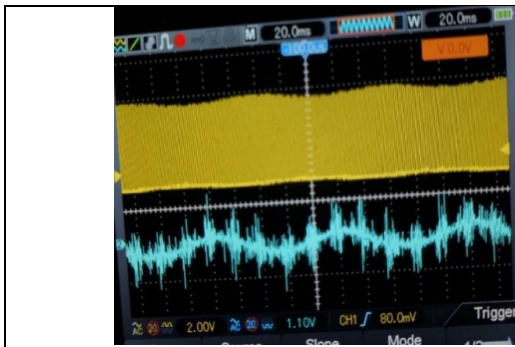


Рис. 4. Осциллограмма 5,1 % АМ сигнала и выходного сигнала на трассе протяженностью 80 м в лаборатории

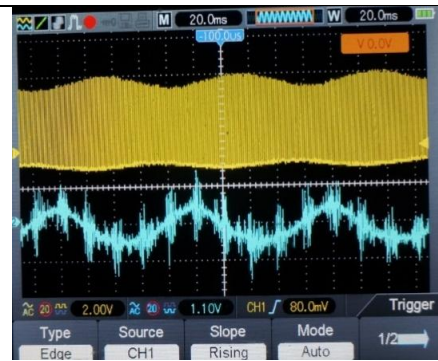


Рис.5. Осциллограмма 10 % АМ сигнала и выходного сигнала на атмосферной трассе

Глубина модуляции 0.4%

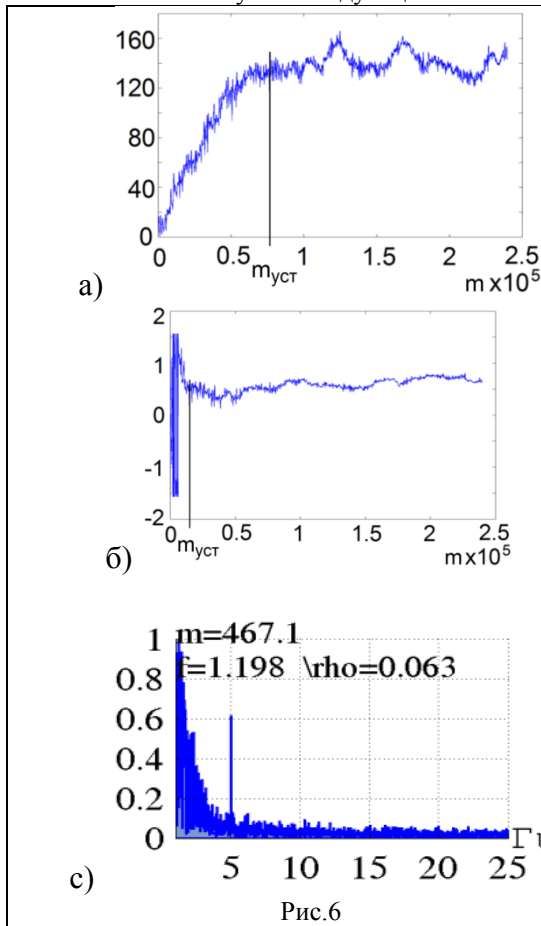


Рис.6

Глубина модуляции 16%

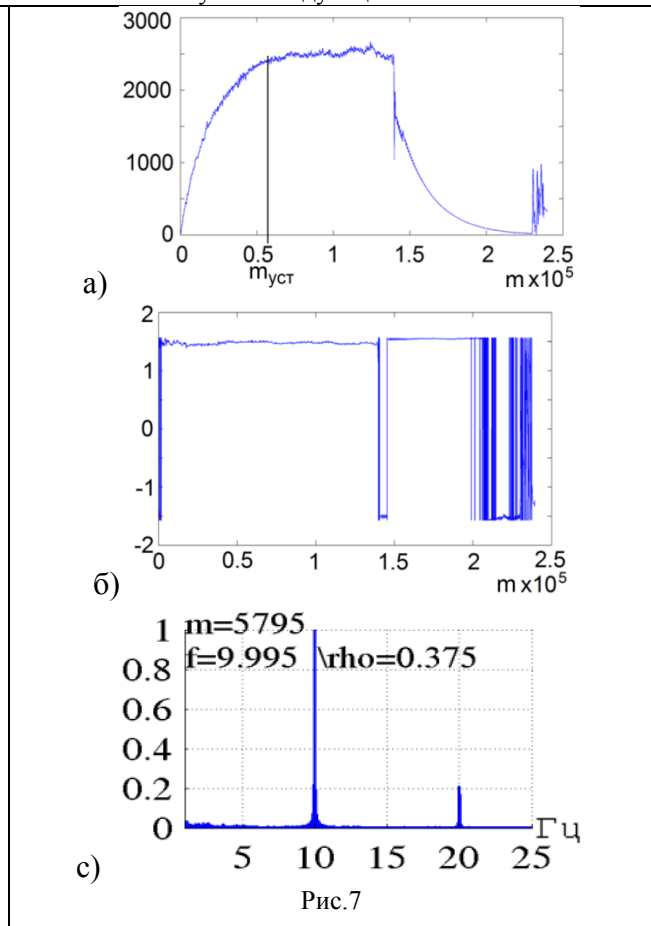


Рис.7

Акустооптические взаимодействия с использованием акустических колебаний вибрационных источников относятся к числу слабых взаимодействий, которые эффективно можно обнаруживать методами накопления сигналов в шумах. С экологической точки зрения в этом несомненное достоинство способа изучения акустооптического взаимодействия на инфранизких частотах.

3. Результаты натуральных высокочувствительных акустооптических измерений на инфранизких частотах. Экспериментально полученные оценки помехоустойчивости параметров акустооптического преобразования в условиях применения комбинированной АОС и помеховой обстановки в натуральных условиях.

Проведены натурные эксперименты по регистрации инфранизкочастотных колебаний от сейсмического вибратора ЦВ-40 с помощью сейсмоакустических систем и приемной лазерной измерительной линии. Схема проведения акустооптических и сейсмических измерений, привязанных к карте местности в районе Быстровского вибросейсмического полигона, представлена на рис.8. Основные компоненты акустооптической системы соответствуют представленным на рис.1. Геометрические параметры их расположения указаны на рис.4. Здесь же указано направление ветра, являющееся встречным для фронта распространения

акустической волны от вибратора к регистрирующей акустооптической системе. Излучение акустических сигналов осуществлялось на дискретных частотах 8.0, 8.5, 9.0, 10.0, 10.5 Гц с длительностью 600 с на каждой.

Представленные выше методы анализа данных по отношению к рассматриваемому эксперименту иллюстрируются графиками на рис. 9, которые аналогичны по форме представлению результатов на рис.6,7.

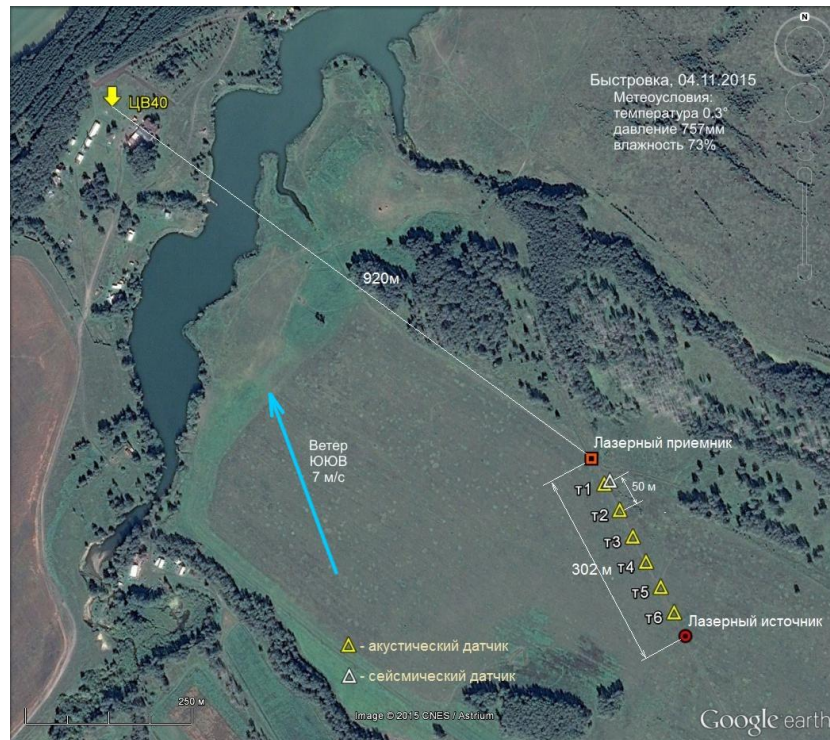


Рис.8. Карта местности и схема расположения устройств акустооптической системы и вибратора ЦВ-40 в районе полигона «Быстровка».

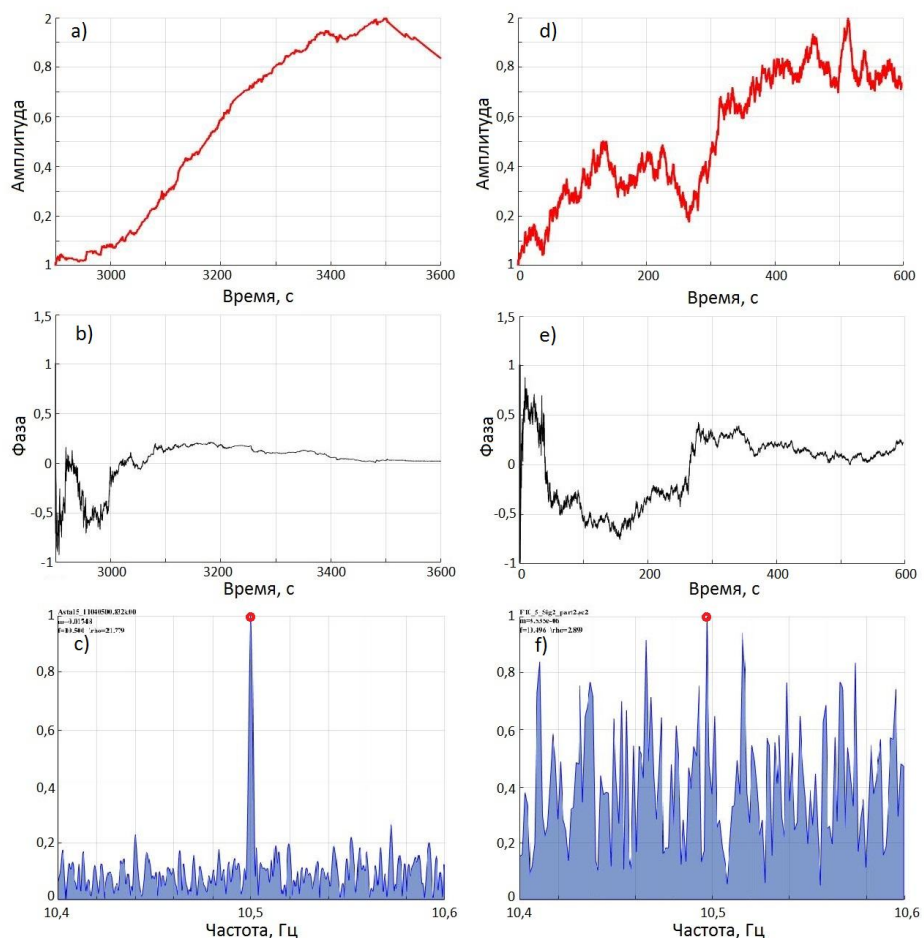


Рис.9 – результаты обработки гармонического колебания частоты 10.5 Гц от вибратора ЦВ-40: для акустического колебания в атмосфере: а) результат накопления по амплитуде; б) фаза акустического колебания; в) спектрограмма колебаний. Для огибающей оптического сигнала: д) результат накопления по амплитуде; е) мгновенная фаза; в) спектр огибающей

На рис.9 представлены результаты обработки гармонического колебания частоты 10.5 Гц от вибратора ЦВ-40 для акустического колебания в атмосфере: а) результат накопления по амплитуде; б) фаза акустического колебания; в) спектрограмма колебаний. Для огибающей оптического сигнала представлены: д) результат накопления по амплитуде; е) мгновенная фаза; в) спектр огибающей

Как следует из рис.9, если отношение сигнал/шум для акустического колебания составляет около 12, то для оптического сигнала оно находится в районе 1.5. Из рис.9е следует, что стабилизация фазы оптического сигнала соответствует большему уровню сигнала (рис.9д).

Для сравнения на рис.10 приведены аналогичные графики обработки колебания от вибратора на частоте 9.5 Гц. Преимущество алгоритма квадратурного накопления перед спектральным методом накопления иллюстрируется сравнением соответствующих результатов обработки на рис. 10д,е и 10в. Если в последнем случае оптический сигнал не выделяется, то в первом случае он обнаруживается с высокой помехоустойчивостью. Рис.10д характеризует уверенное обнаружение оптического сигнала в шумах, а рис.10е – уверенное становление фазы оптического сигнала в момент прихода соответствующего акустического колебания.

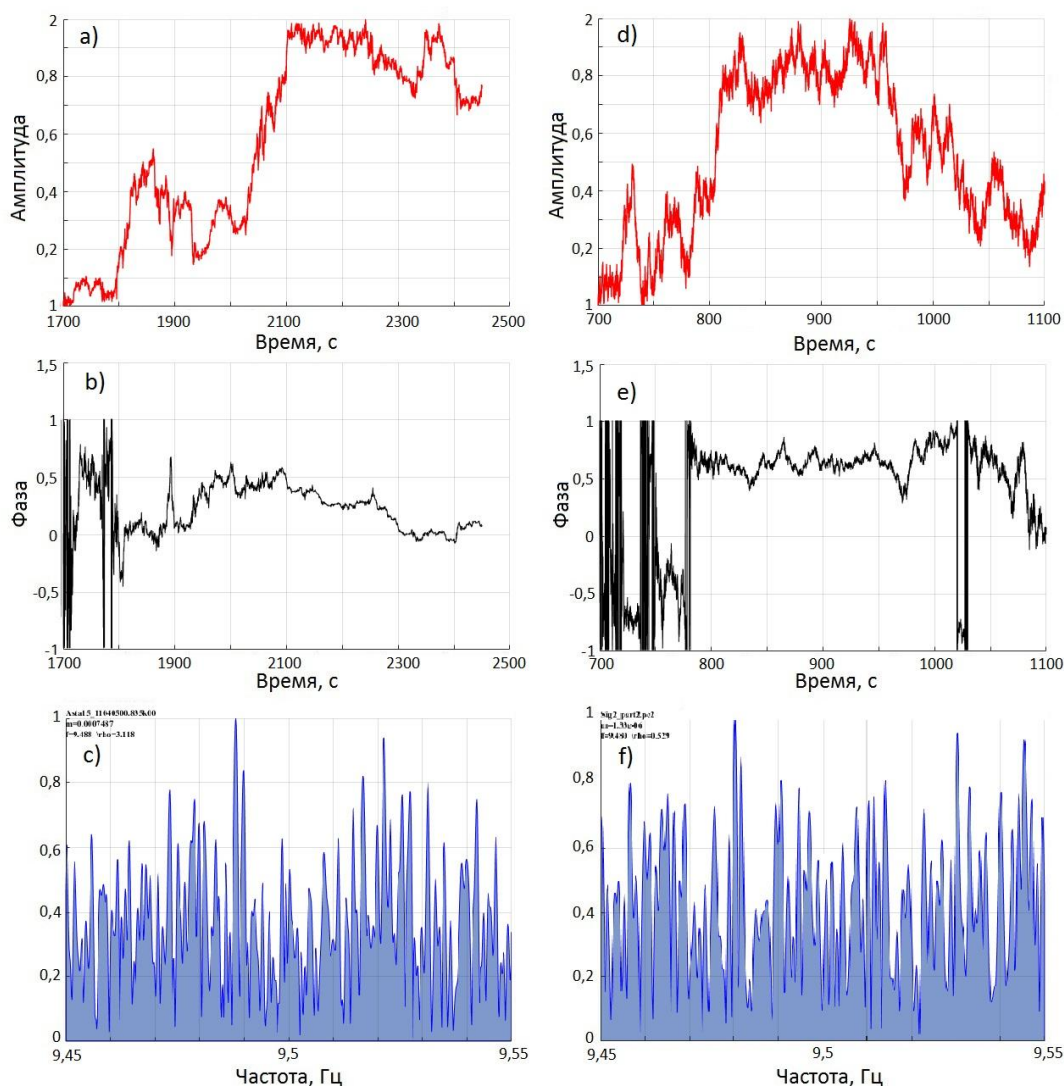


Рис.10. Результаты обработки гармонического колебания частоты 9.5 Гц от вибратора ЦВ-40: для акустического колебания в атмосфере: а) результат накопления по амплитуде; б) фаза акустического колебания; в)-спектрограмма колебаний. Для огибающей оптического сигнала: д) результат накопления по амплитуде; е) мгновенная фаза; в) спектр огибающей

По результатам измерений усредненный уровень акустических давлений вдоль оптического луча длиной 300м составляет – 0.01 Па. Этому соответствует смещение оптического луча около $10^{-7} - 10^{-6}$ м. Очевидно, что измерение таких уровней смещения доступно лишь алгоритмам накопления типа (5), предназначенным для получения оценок, в первую очередь, в нанометровом диапазоне. Графики на рис. 9, 10 доказывают это.

Сравнительное оценивание помехоустойчивости выделения акустических и оптических сигналов показывает на более высокую либо сравнимую помехоустойчивость оценивания параметров акустических колебаний в сравнении с оптическими. Уменьшение параметра помехоустойчивости выделения оптических колебаний, определяемого соотношением сигнал/шум, может вызываться рядом факторов: повышенной чувствительностью к метеоусловиям (направление и скорость ветра, температура, влажность и плотность окружающего воздуха), турбулентностью атмосферы. В рассматриваемом случае основным фактором, определяющим уменьшение уровня акустических колебаний в точках регистрации, является направление и скорость ветра: как следует из рис. 8 ветер практически направлен навстречу фронту распространения акустической волны от вибратора ЦВ-40 и имеет скорость 7м/с. В этом случае уровень акустической волны падает более чем в 5 раз, что и наблюдается на спектрах акустических сигналов. По отношению к оптическим колебаниям происходит дополнительное ослабление их уровня.

Таким образом, в соответствии с задачами проекта выделены информативные параметры характеризующие акустооптическое взаимодействие – фазо-частотные характеристики оптического сигнала. Для выполнения измерений созданы алгоритмы и программы одновременной обработки акустических и оптических данных.

Ограничительным фактором, влияющим на точность оценивания параметров акустооптического взаимодействия, является нестабильность частоты генератора, задающего частоту следования импульсов накачки. Экспериментально наличие дрейфа определялось на основе получения и анализа реализаций спектров периодичности импульсных сигналов накачки, приведенных на рис.11.

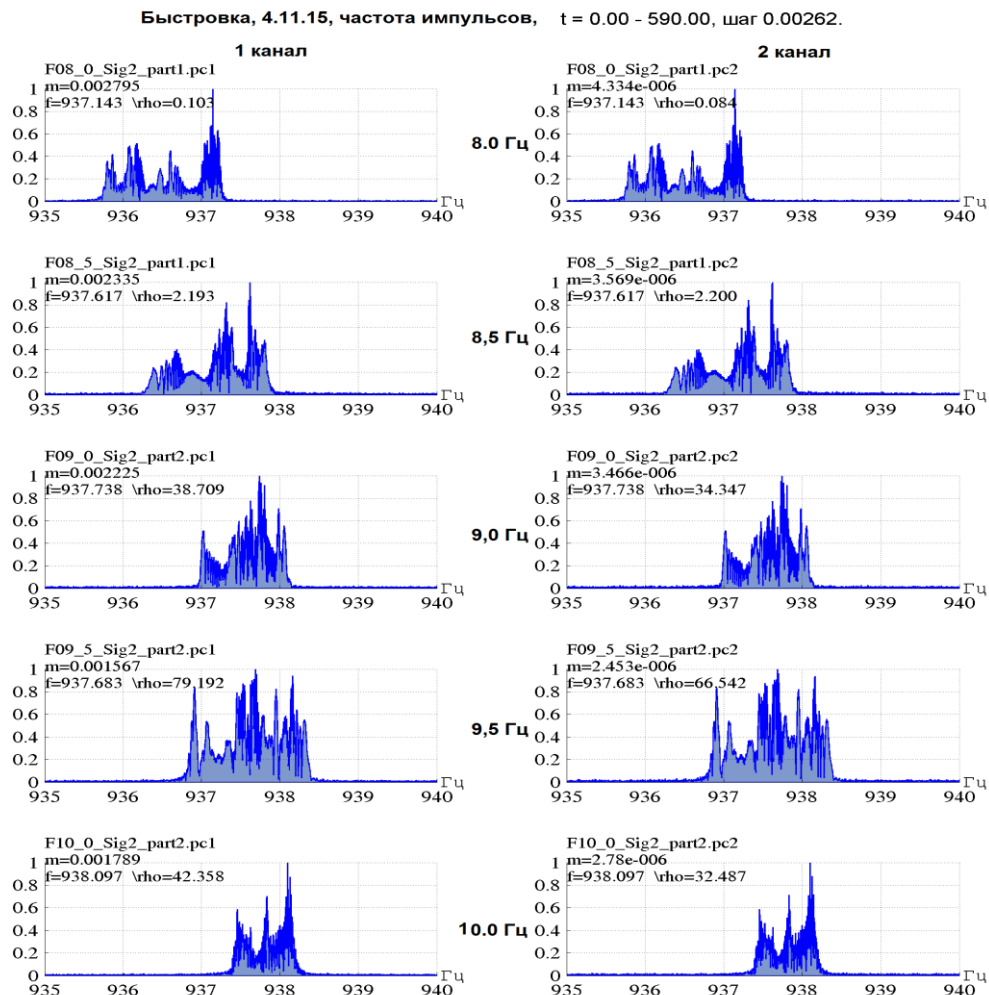


Рис.11. Реализации спектра оптического сигнала во времени.

Из анализа спектров следует количественная оценка максимального значения девиации частоты, составляющая 0.2%. Полученная оценка определяет точность оценивания положения мод сигнала накачки на частотной оси.

Оба проанализированных фактора определяют выбор схем измерения для достижения эффекта высокочувствительного акустооптического взаимодействия. Приведенные результаты позволяют характеризовать значения погрешностей оценивания параметров с учетом принимаемой интенсивности колебаний. Разработанные средства иллюстрируют высокую чувствительность лучевого метода регистрации к потенциально низким акустическим воздействиям с глубиной модуляции выходного оптического сигнала до уровня 0.1% либо до 10^{-3} уровня входного сигнала.

Рассмотренный тестовый эксперимент соответствует режиму акустооптического взаимодействия монохроматических колебаний вибрационного источника со световыми колебаниями.

Наряду с рассмотренным режимом вибрационные источники способны излучать широкополосные колебания, описываемые свип-сигналами с частотной модуляцией. Такие сигналы представляются в виде

$$S(t) = A(t) \cos(\omega_0 t + \beta t^2 / 2), \quad (6)$$

где β – скорость нарастания частоты, $A(t)$ – огибающая сигнала.

Обработка колебаний вида (6) осуществляется с помощью алгоритма и программы взаимокорреляционной свертки для накопления акустических и оптических сигналов на фоне многократно превышающих шумов.

Для этих целей разработана и успешно апробирована в экспериментах с вибратором ЦВ-40 методика корреляционного накопления сигналов, позволяющая выделять акустические волны с уровнями до 0.001 Па. Это важный результат, поскольку корреляционный метод выявления акустооптического взаимодействия с применением двулучевой лазерной измерительной линии относится к числу наиболее информативных. В частности, созданная методика была испытана в экспериментах по выделению акустических волн от вибратора ЦВ-40 на удалениях до 100 км от источника. На рис.12 представлен частный результат взаимной корреляционной свертки регистрируемого сигнала с опорным, по форме повторяющим сигнал от источника. Регистрация сигналов и свертка реализуется в диапазоне частот 7.91-11.23 Гц одновременно по 6 каналам, каждый из которых подключен к своему датчику. Измеренный таким образом уровень давления в точке регистрации соответствует в среднем 0.005 Па. Для данного случая в таблице 1 приведены метеоданные, при которых производились измерения уровней. В ближней зоне вибратора ЦВ-40 (на удалении 200м) измеренное акустическое давление в среднем составляет 0.5 Па.

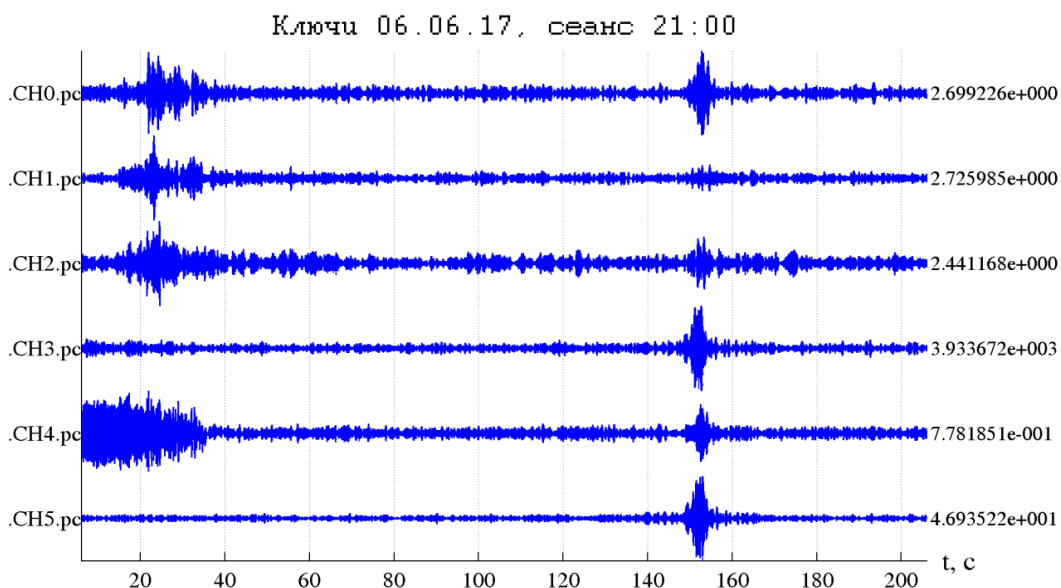


Рис12. Вид корреляционной свертки на удалении 50 км от источника

Приведенные числовые характеристики определяют уровни давлений, которые развиваются при анализе акустооптических взаимодействий с использованием вибрационного источника. Несмотря на столь малые приведенные значения интенсивности инфразвука изучать акустооптические взаимодействия становится возможным за счет использования когерентных методов накопления, которые поддерживаются источниками с прецизионными метрологическими характеристиками.

Таблица 1

Дата	Местное время	Температура, град	Давление на ур. Станции, мм	Влажность, %	Направление ветра	Сила ветра, м/с	Осадки	Облачность, %
7 июня 2017	7	16.0	746.8	52	С	1		10
	4	16.0	747.2	45	С	2		10
	1	17.7	748.1	47	ССЗ	1		10
6 июня 2017	22	20.3	748.3	43	С	2		10

4. Двухлучевая лазерная измерительная линия для изучения акустооптических взаимодействий на инфранизких частотах.

Выше было показана высокая чувствительность фазовых характеристик оптического луча к модулирующему внешнему акустическому излучению. С учетом этого разработан проект и создан макет двухлучевой лазерной измерительной линии для изучения акустооптических взаимодействий на инфранизких частотах. Наряду с процессами возмущения оптических колебаний полезными акустическими большую роль при этом играют атмосферные факторы, выступающие в роли фоновых помех для акустооптического взаимодействия. С учетом этого дальнейшее совершенствование и развитие акустооптической системы инфразвуковых частот в направлении повышения помехоустойчивости и точности оценивания параметров внешнего акустического поля базируется на основе применения двухлучевой лазерной измерительной линии. Идея такого подхода состоит в том, для акустических колебаний, волновой фронт которых перпендикулярен к линиям световых лучей, огибающие импульсов накачки на выходах обоих приемников будут находиться между собой в противофазе при расстоянии между лучами в пол длины акустической волны. Принимая такой дифференциальный метод измерений, достигается более высокая чувствительность к выделению акустического сигнала на фоне помех, вызванных атмосферными факторами. На этом принципе разработан и создан макет двухлучевого оптического стенда. Обобщенная структура его представлена на рис. 13а, более полная структурная схема – на рис.13б. Излучатель 1 закреплен рядом с приемником 1. Приемник 2 перемещается относительно приемника 1 на расстоянии D_r . В качестве излучателя используется полупроводниковый лазер АТС8000, со схемой накачки, обладающей следующими параметрами: длительность излучаемых импульсов накачки-50 мкс; Частота импульсов – 1000 Гц; импульсный ток лазера – 7,8 А; угол расхождения излучения – 1°. В качестве оптической системы (ОС) приемника используется оптика от оптической атмосферной линии связи ОСС2 с параметрами: фокусировка на оптическое волокно (ОВ) FT600UMT (диаметр сердцевины 600 мкм) длиной 0,5 м. Поле зрения приемника составило 0,085°. Излучение с ОВ подается на фотодиод КДФ113 и усиливается. Сигнал с усилителя регистрируется осциллографом АКИП.

Излучатель и приемники расположены на бетонном постаменте. Внешний вид стенда с телескопом представлен на рис. 14 .

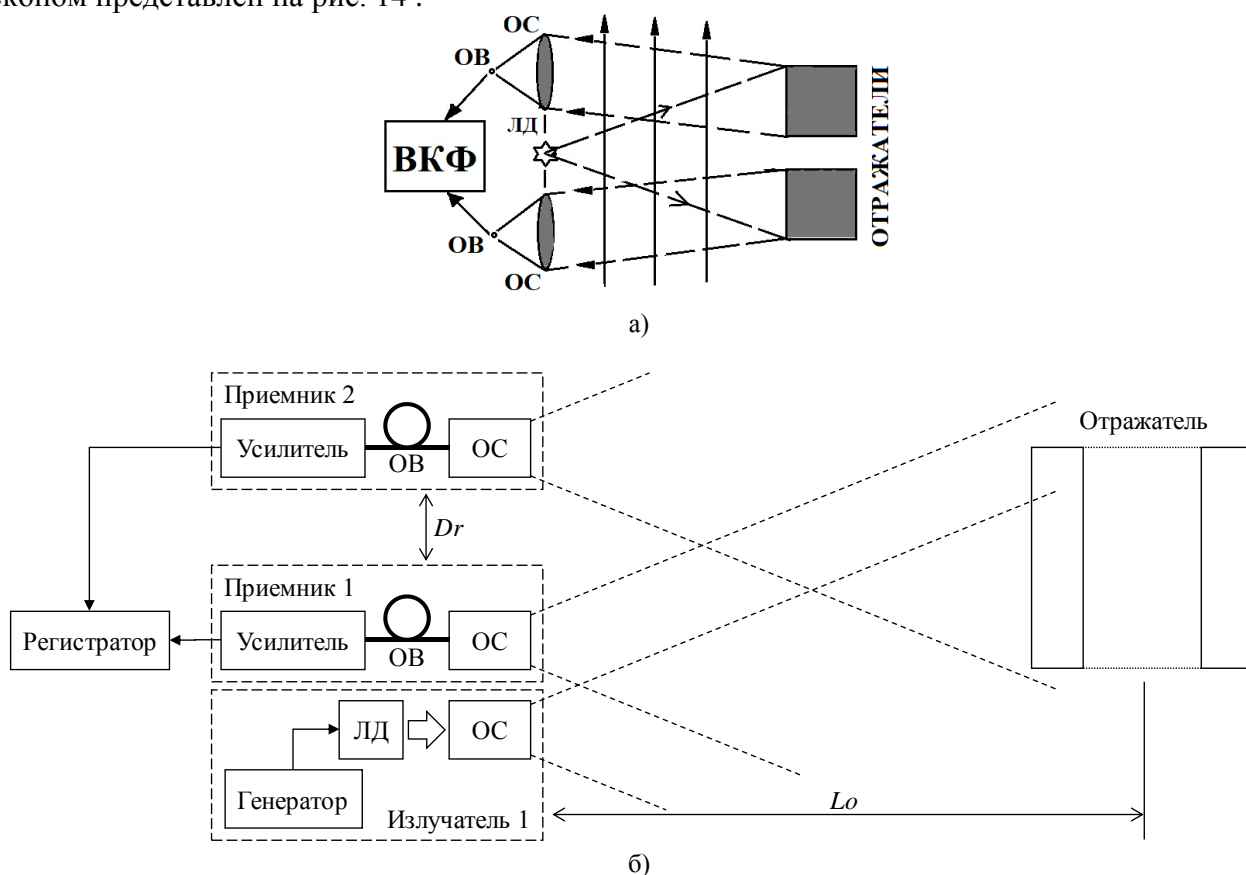


Рис. 13. Структура оптического стенда. ОС-оптическая система, ОВ-оптическое волокно, ЛД-полупроводниковый лазер.



Рис. 14. Вид стенда с телескопом

Для макета отражающего стенда используются два наборных рефлектора с размерами 15×50 см, разнесенных на расстояние 15 см друг от друга. Предусмотрено крепление и установка рефлекторов при помощи геодезического штатива на заданном расстоянии от постамента. Методически во время эксперимента приемники настраиваются на максимальный сигнал излучения лазерным дальномером Veber LR100s. Точность позиционирования по GPS/ГЛОНАСС – 10 м. Точность измерения расстояния по дальномеру составляет ±1м.

Одна из основных целей эксперимента с применением описанного оптического стенда заключалась в проверке разрешающей способности по угловым координатам блока фотоприемника (БФ), в основе которого лежит фотоприемник S11638 от оптической системы

передачи данных ОСС. При проведении экспериментов отражатель относился от постаментов на расстояния: 100; 200; 400; 600; 800 м. Точки расстановки отражателя на местности представлены на рис. 15. Расстояние первоначально определялось по приемнику GPS/ГЛОНАСС и уточнялось.

Максимальная дальность, определяемая дальномером не более 1000 м. Излучение с излучателя 1 направлялось на сборку рефлекторов, расположенных в области поля зрения оптической системы блока фильтров (БФ), приемников 1,2. В качестве БФ используется многоэлементный оптический приемник, построенный на базе фотолинейки S11638. Отраженное излучение собиралось линзой и попадало на чувствительную область фотолинейки. Выходной сигнал с фотолинейки оцифровывался, и полученные данные передавались на персональный компьютер (ПК).



Рис. 15. Положение точек расстановки отражателя на местности

На ПК работает управляющая программа, при помощи которой производится построение теневой диаграммы фотолинейки и непрерывная запись данных в файл. В качестве примера на рис.13 приводятся теневые диаграммы для расстояний 100 (рис.16а) и 400 м (рис.16б).

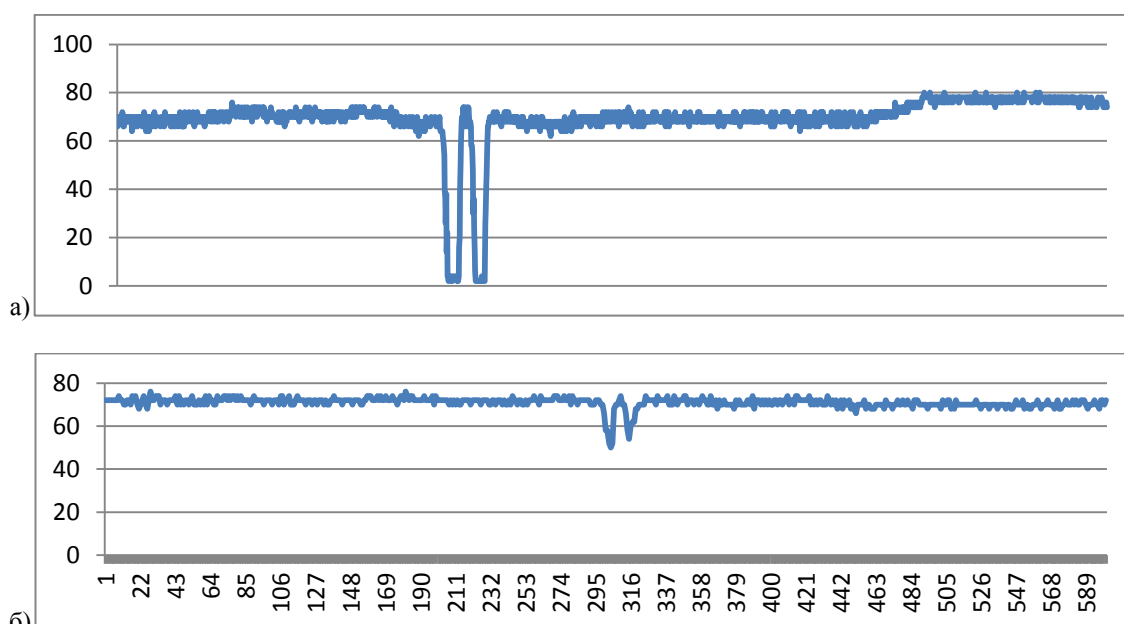


Рис. 16. Сигнал с фотолинейки: а) при расстоянии 100 м; б) 400м.

Как видно из приведенных теневых диаграмм блок фильтров БФ в совокупности с оптической системой ОСС способен разрешать два рефлектора с зазором между ними 150 мм, расположенных на расстоянии 400 м от ОСС. Расстояние 400 м оказалось предельным для

данной схемы. Расчетная разрешающая способность, а так же расстояние между пиками теневых диаграмм, отражены в таблице 2. Из полученных данных видно, что по результатам всех измерений, расстояние между центрами рефлекторов составляет около 300 мм.

В результате проведения тестовых экспериментов по определению разрешающей способности оптической системы с учетом выбранного типа фотолинейки – S11638 и получения теневых диаграмм отраженного излучения на дальностях 100-400м от лазерных излучателей найдено предельное расстояние, на котором могут быть зафиксированы отраженные сигналы от двух разнесенных рефлекторов. Полученные данные определяют необходимость учета требования по выбору параметров оптической системы для достижения дальности, необходимой при проведении исследований по акустооптическим взаимодействиям. Оба проанализированных фактора определяют выбор схем измерения для достижения эффекта высокочувствительного акустооптического взаимодействия.

Таблица 2. Результаты измерений

Расстояние до отражателя	Расчетное разрешение БФ, мм	Количество элементов м-у пиками теневой диаграммы, шт	Расстояние м-у засвеченными элементами, мкм
100	7	51	714
200	14	32	448
400	28	12	168

5. Аналитические оценки метода мониторинга сейсмоакустических и инфразвуковых волн на атмосферных линиях с высокостабильным лазерным излучением.

Развитие малогабаритных стандартов частоты со стабильностью до 10^{-16} предоставляет новые возможности по оценке изменения оптических параметров атмосферы (коэффициента преломления n_i , коэффициента пропускания Q) по приземной трассе длиной L распространения лазерных импульсов с частотой F_n и длительностью τ [1-4]. Как известно, время распространения лазерного импульса T_p зависит от параметра преломления n_i , который в свою очередь зависит от температуры $T(t)$, давления $P(t)$, аэрозольного $A(t)$ и газового $\Gamma(t)$ состава атмосферы на трассе L . На коротких трассах длиной менее 1 км скорость изменения этих параметров составляет более сотен миллисекунд за исключением быстрого изменения $P(t)$ из-за наличия в атмосфере акустических колебаний с частотой F_a распространяющихся поперек трассы L со скоростью V_a равной 330 м/с.

Таким образом, если измерять время распространения или частоту импульсов F_n на периодах менее сотен миллисекунд (период замороженной атмосферы) можно оценить влияние быстрого переменного акустического давления P_a на изменение F_n .

Соответствующая структура метода измерений для мониторинга инфразвука представлена на рис. 17. Численная оценка требования к частоте и стабильности импульсов показывает, если P_a во фронте волны увеличивает нормальное начальное давление на 1 тысячную, то коэффициент преломления увеличится на одну тысячную и скорость уменьшится на одну тысячную и время прохода одним импульсом трассы L увеличится на одну тысячную по сравнению с нормальным давлением.

Если фронт акустической волны занимает в пространстве 5 м и его время прохода через ось лазерного пучка составляет 15,15 мс., то тогда за этот период пройдет на одну тысячную меньше количества импульсов, чем при нормальном давлении. И наоборот, в спаде волны произойдет уменьшение давления и, соответственно, увеличение скорости движения импульсов и их количества за один и тот же промежуток времени.

Однако мы не знаем фазу или время прихода фронта волны, чтобы в этот период начать счет импульсов. Поэтому целесообразно измерять количество импульсов N_i например на последовательных интервалах меньшей длительности фронта волны, например в 1 мс, а затем сравнивать N_i (или F_n) и при соблюдении неравенства $N_{i0} < N_{i+1} < N_{i+2} < \dots < N_{i+n}$ делать вывод о наблюдении фронта акустической волны.

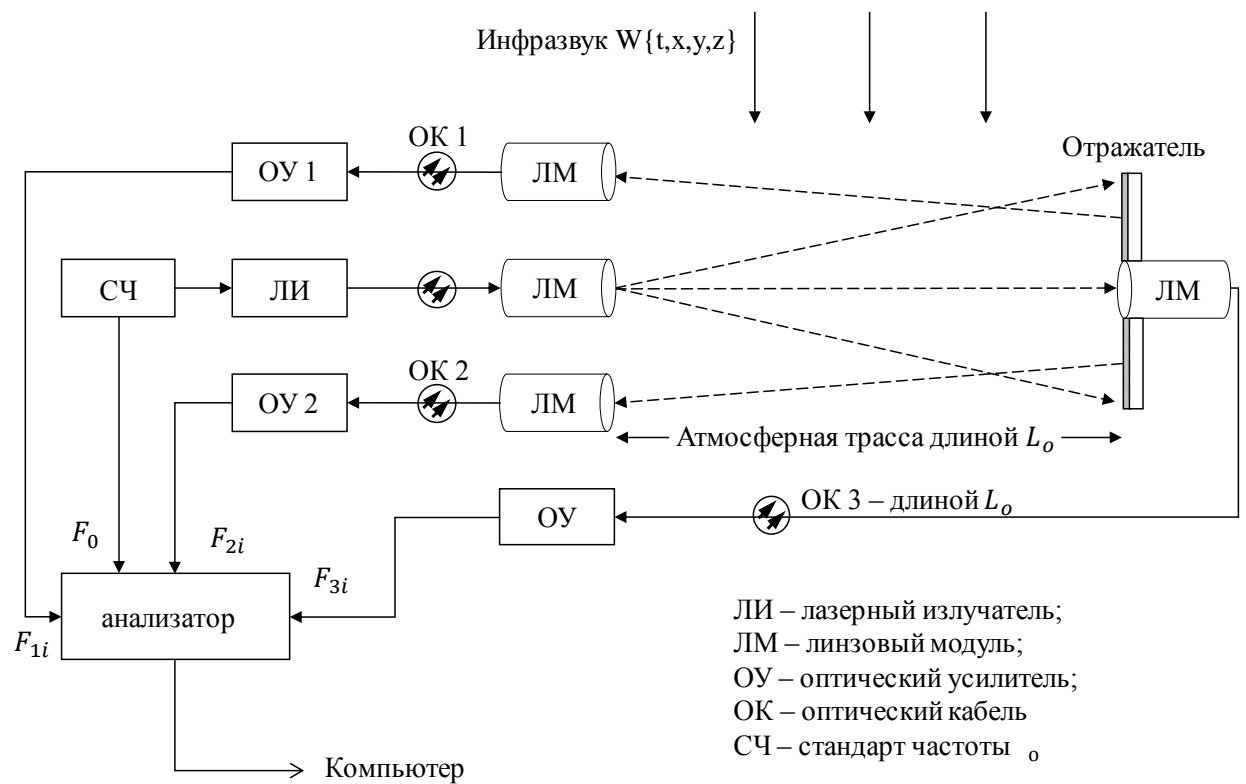


Рис.17 – Структура метода мониторинга инфразвука с высокостабильным лазерным лучом

В основе метода измерений лежит использование стандарта частоты (СЧ) для формирования стабильной частоты F_0 потока лазерных импульсов в лазерном излучателе на длине волны λ_0 .

Требования к стабильности F_0 обусловлено ожидаемым изменением коэффициента преломления излучения на длине λ_0 , на трассе L_o . Так, показатель преломления воздуха n_i относительно вакуума при 15°C и давлении 0,1 МПа для $\lambda_0 = 550 \text{ нм}$ составляет $n_i(550\text{нм}) = 1.0002771$.

Величина показателя преломления в атмосфере зависит от температуры $t^\circ\text{C}$, плотности воздуха N , которая в свою очередь зависит от высоты подъема над уровнем моря h_i и изменения атмосферного давления. Так же на показатель преломления влияет влажность воздуха [5]. Флуктуации показателя преломления воздуха уменьшаются при росте высоты над уровнем моря от 0 до 2 км в $0,95/0,82 = 1,158$ раз. Упрощенная зависимость флуктуации описывается формулой [5] $dn/dT = (78P/T^2) 10^{-6}$, где P – локальное атмосферное давление в мбар; T – температура в К.

В общем случае время распространения лазерного импульса на длине волны λ от лазерного излучателя ЛИ до отражателя, равно

$$t_{1.1} = \frac{L_o}{c_o/n_i} = \frac{n_i L_o}{c_o},$$

а от отражателя до оптического усилителя ОУ

$$t_{1.2} = \frac{L_o}{c_o/n_i} + \frac{L_{ok}}{c_o/n_{ok}} = \frac{n_i/L_o}{c_o} + \frac{n_{ok}/L_{ok1}}{c_o}$$

где L_{ok1} – длина оптического кабеля ОК1; n_{ok1} – коэффициент преломления в оптическом кабеле на длине волны λ . Общее время $t_1 = \frac{2n_i}{c_o} + \frac{n_{ok}L_{ok1}}{c}$. Время распространения по второму тракту t_2 с ОК2 равно T_1 . Время распространения по тракту с оптическим кабелем ОК3 равно

$$t_3 = \frac{n_i L_o}{c_o} + \frac{n_{ok} \cdot L_o}{c_o}$$

Если учитывать, что коэффициент преломления в оптическом кабеле $n_{ok} > n_i$, то при отсутствии оптических кабелей ОК1 и ОК2, лазерный импульс на оптические усилители ОУ1 и ОУ2 поступит значительно раньше, чем на ОУ3. Эта разница равна

$$\Delta t_p = \frac{n_{ok} \cdot L_o}{c_o} - \frac{n_i L_o}{c_o}$$

Так например при $L_o = 100 \text{ м}$ и $n_{ok} = 1,45$ и $n_i = n_o(0,55 \text{ мкм}) = 1,0002771$

$$\Delta t_p \approx 149.90763 \cdot 10^{-9} \text{сек}$$

Если принять, что при определенной длине оптического кабеля $OK_2 = L_{\text{опр}}$, время прихода лазерных импульсов на ОУ2 и ОУ3 совпадает, то можно записать уравнение

$$\frac{n_i L_o}{C_o} + \frac{n_{ок} \cdot L_o}{C_o} = \frac{n_i \cdot L_o}{C_o} + \frac{n_i L_o}{C_o} + \frac{n_{ок} L_{\text{опр}}}{C_o} \quad (8)$$

или удаляя из уравнения (8) $n_i L_o / C_o$, получим

$$\frac{n_{ок} \cdot L_o}{C_o} = \frac{n_i \cdot L_o}{C_o} + \frac{n_{ок} L_{\text{опр}}}{C_o}$$

Отсюда искомый коэффициент преломления n_i равен

$$n_i = n_{ок} (1 - L_{\text{опр}} / L_o) \quad (9)$$

Таким образом, в структуре метода измерения (рис.17) установив длину ОК2 равной $L_{\text{опр}}$ (или время задержки импульса после ОУ2 равно $t_{\text{зад}} = L_{\text{опр}} / n_{ок} \cdot C_o$) можно определить $n_{нач}$ при определенных условиях и затем измерять отклонения от $n_{нач}$.

При условии постоянства во времени коэффициента преломления n_i по трассе L_o $-n_i = \text{const}$ исходная частота F_o и период следования T_i импульсов после прохождения трассы не будут изменяться за определенный промежуток времени (время заморозки атмосферы).

Для инфразвуковой волны с частотой ω ,двигающейся поперек трассы L_o со скоростью звука v , время прохождения трассы одним колебанием длительностью $1/\omega$ для частоты $\omega = 10$ Гц равно 100 мс. Время между наступлениями максимального и минимального давления по трассе составит 50 мс, если принять что зона максимального и минимального давления в волне занимает в пространстве 3 м, то эта зона пройдет оптический пучок за время $t_{\text{пр}} = 3 \text{ м} / v \approx 9,09 \cdot 10^{-3}$ с. Тогда за это время пройдет меньшее количество импульсов т.к. $n_i > n_{нач}$ и $F_{2i} < F_o$.

6. Программно-аппаратный комплекс и результаты проведения экспериментальных исследований на лазерном полигоне «Кайтанак» (горный Алтай) с целью оценивания параметров акустооптического преобразования на инфранизких частотах

Для экспериментальных исследований узлов стенда для прецизионных измерений для оценки метода мониторинга были разработаны макеты внешнего линзового модуля с линзой диаметром 9 см с фокусом 21 см, с фокусированием принятого излучения на торец волокна диаметром 1000 мкм, оптического кабеля POF SIMPLEX FD PE – PUR длиной 60 м, который доставлял принятое излучение на оптический усилитель (волоконный приемник) установленный на постаменте в лабораторном корпусе, угол поля зрения ЛМ около 18'. В качестве отражателя оптических сигналов использовался набор из катафотных отражателей размером 6×12 см, четыре штуки по горизонтали и семь по вертикали, размещенных на металлической пластине (Рис.18). Узлы стенда, размещаемые в лабораторном корпусе представлены на рисунке 19. В качестве модельного излучателя использовался мощный светодиод (200 мВт) на 530 нм с частотой $f_o = 1,2$ кГц и длительностью импульсов 80 мкс. Линзой диаметром 50 мм формировался пучок с углом расходимости около 30'. Для приема излучения использовался линзовый модуль диаметром 4 см с оптическим усилителем от блока «ПИК-1М» ($\Delta F < 1$ МГц), а также оптический широкополосный (~5 МГц) усилитель с полимерной дифракционной антенной апертурой 170 см².

Оптический сигнал с оптического кабеля подавался на оптический усилитель с волоконным входом и с полосой пропускания менее 1 МГц. Вид принятых импульсных сигналов длительностью 80 мкс показан на рис.20. Из них видно, что наиболее быстро поступали импульсы от широкополосного приемника, прошедших трассу 38 + 38 м.



Рис. 18. Стенд с линзо-волоконной линией и сегментированными отражателями на внешнем постаменте



Рис. 19. Приемный стенд с оптоэлектронными и волоконным приемниками и многоканальным осциллографом в лабораторном корпусе

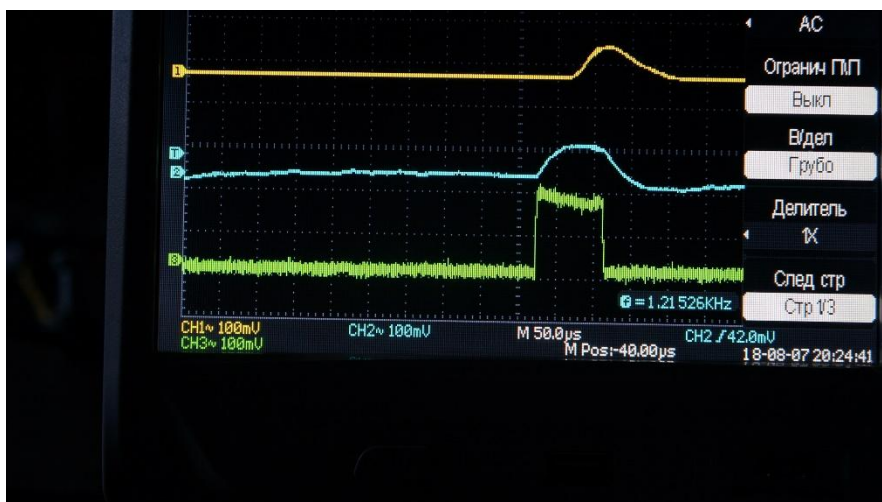


Рис.20. Выходные сигналы с оптоэлектронных приемников стенда (вверху – импульс с узкополосного приемника отраженных оптических сигналов, в середине – импульс с усилителя сигнала оптического кабеля, внизу – импульс с широкополосного усилителя отраженных оптических сигналов)

Анализ изменения среднего текущего значения амплитуды импульсов на интервале 75 с (Рис. 1.6.) показывает, что при ясной атмосфере (МДВ > 10 км) изменения среднего не

превышали 5–8 %. Регистрация импульсов производилась на многоканальном цифровом осциллографе АКИП – 4119/4 и осциллографе Hantec DSO 1202B.

Предварительные измерения позволили оценить уровни сигналов на трассах, которые превышали в десятки раз уровни помех. Также необходимо отметить, что при расчетном времени распространения оптических импульсов по атмосфере в 250 нс, необходимы оптические усилители с полосой пропускания не менее 1 ГГц для оценки изменения скорости распространения оптических импульсов.

Измерения на стенде проводились в период со 2 по 7 августа 2018 г. при температуре в лабораторном корпусе не ниже 20°C и в период с 11 по 14 сентября 2018 г., когда температура в корпусе снижалась до – 4°C. При этом наблюдалось снижение уровня принятых сигналов на 30 – 40 % из-за снижения температуры в корпусе до – 4°C.

7. Создание и исследование метода обнаружения инфразвука в атмосфере на основе корреляции параметров молекулярного рассеяния ультрафиолетовых импульсов с изменением концентрации молекул в инфразвуковой волне.

Развитие методов построения информационных систем в ультрафиолетовом «солнечно – слепом» диапазоне менее 0,29 мкм [2–7] дает возможность анализа вопросов влияния акустических волн в атмосфере на параметры рассеяния фотонов. При распространении оптического импульса в воздухе ослабление его мощности зависит от рассеяния фотонов на молекулах воздуха в атмосфере (теория Релея – Тиндаля) и рассеяния на тепловых флуктуациях плотности газа (теория Эйнштейна – Смолуховского). Объемный коэффициент молекулярного рассеяния G равен

$$G = \frac{8\pi^3(n^2 - 1)^2}{3N\lambda^4} \times \left(\frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta} \right)$$

Из этого соотношения видно, что значительно рассеяние зависит от длины волны λ и концентрации (плотности) частиц N . Для рассеяния неполяризованного излучения применяется соотношение

$$\beta_p(\nu) = \frac{8\pi^4 r^6}{\lambda^4} N a \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right),$$

где r – размер молекулы, (10^{-4} мкм для воздуха); n – показатель преломления среды; Na – количество молекул в единице объема ($2,55 \cdot 10^{19}$ для воздуха на уровне моря); Θ – угол между направлением наблюдения и осью декеля; λ – длина волны излучения. Так для $\lambda = 0,36$ мкм $G = 6,680 \cdot 10^{-2}$ км⁻¹, для $\lambda = 0,8$ мкм $G = 2,545 \cdot 10^{-3}$ км⁻¹, при этом оптическая толщина атмосферы по вертикали τ меняется от 0,5653 до $2,545 \cdot 10^{-3}$ (без учета поглощения в атмосфере). В свою очередь коэффициент преломления зависит от длины волны излучения и от давления в воздухе.

Коэффициент преломления оптического излучения в воздухе определяется по соотношению $n - 1 = (n_0 - 1) \frac{P}{P_0}$, где P – плотность воздуха, $P_0 \approx 1,20903 \approx 1,20903 \cdot 10^{-3}$ г/см⁻³; n_0 – коэффициент преломления при давлении 1000 мбар, температуре $T_0 = 15^\circ$ и нулевой влажности. В свою очередь P зависит от изменений атмосферного давления, которые также могут быть обусловлены акустическими волнами. Возможны две конфигурации построения измерительной УФ линии: первая с разносом УФ передатчика и УФ приемника с наклонными трассами распространения УФ пучков и приемом прямого рассеянного сигнала; вторая с размещением УФ передатчика и приемника рядом и с приемом обратного рассеяния. В качестве математической модели для расчета принятой мощности для первой конфигурации $P_{np} = J * P_{изл}$, используют выражение для передаточной функции J (2.1):

$$J = \frac{S_{np}}{L \sin \varphi} \int_{\varphi - \gamma/2}^{\varphi + \gamma/2} \left\{ \frac{3\delta_m(h)}{16\pi} (1 + \cos^2(\varphi + \omega)) + \delta_a(h) \mathcal{E}_a(\varphi + \omega) \right\} \times \exp \left\{ - \left(\frac{1}{\sin \varphi} + \frac{1}{\sin \omega} \right) \int_0^h \alpha(H) dH \right\} d\omega, \quad (3)$$

где δ_m и δ_a – коэффициенты молекулярного и аэрозольного рассеяния излучения с данной длиной волны; α – полный коэффициент ослабления атмосферой лазерного излучения с данной длиной волны; $\mathcal{E}_a(\varphi)$ – индикатриса аэрозольного рассеяния; h – высота точки рассеяния над землей; $S_{пр}$ – площадь апертуры приемника; $\delta_m(h)$, $\delta_a(h)$ и $\alpha(H)$ – высотные зависимости коэффициентов. Зависимости передаточной функции $\gamma(\lambda)=10\log(P_{пр}/P_{изл})$ на рис. 21 и 22 оценивались по приближенной формуле атмосферного канала, принимающего рассеянное излучение, без учета аэрозольного рассеяния при следующих исходных данных: угол места приемопередатчиков – 10° ; угол поля зрения приемника 3° ; расходимость излучения передатчика 1° .

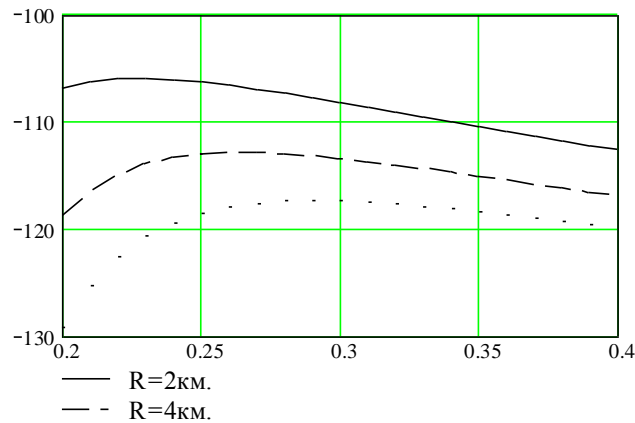


Рис. 21. Зависимость передаточной функции $\gamma(\lambda)=10\log(P_{пр}/P_{изл})$ [дБл] канала с рассеянием от длины волны излучения [мкм] при расстояниях между приемопередатчиками 2, 4 и 6 км.

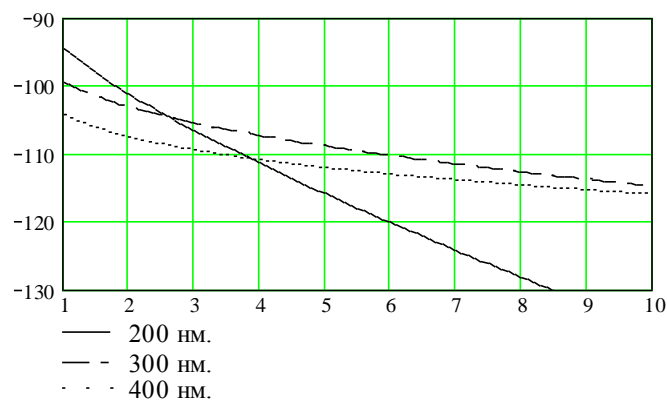


Рис.22. Зависимость передаточной функции $\gamma(\lambda)=10\log(P_{пр}/P_{изл})$ [дБл] канала с рассеянием от дальности связи [км.].

Натурные эксперименты по приему рассеянного сигнала проводились в летнее время на трассе от 50 м до 1200 м, расположенной вдоль канала шлюза новосибирской ГЭС. На рис.23 представлены расчетные и экспериментально полученная зависимости амплитуды сигнала на выходе приемника от расстояния между приемопередатчика при углах подъема передатчика и приемника 5° и 10° соответственно. Расчет выполнен для длин волн излучения 220, 250 и 300 нм в атмосферном канале с молекулярным рассеянием, используя модель (3), со следующими исходными данными: мощность излучения передатчика $P_0=2$ Вт; угол подъема передатчика $\alpha = 5^\circ$; площадь апертуры приемника $S = 28$ см²; угол подъема приемника $\beta = 7.5^\circ$; угол поля зрения приемника $\theta = 7.5^\circ$; чувствительность приемника 10^8 В/Вт Точность регистрации данных, вследствие флуктуации амплитуды принимаемых импульсов, составила 50 мВ.

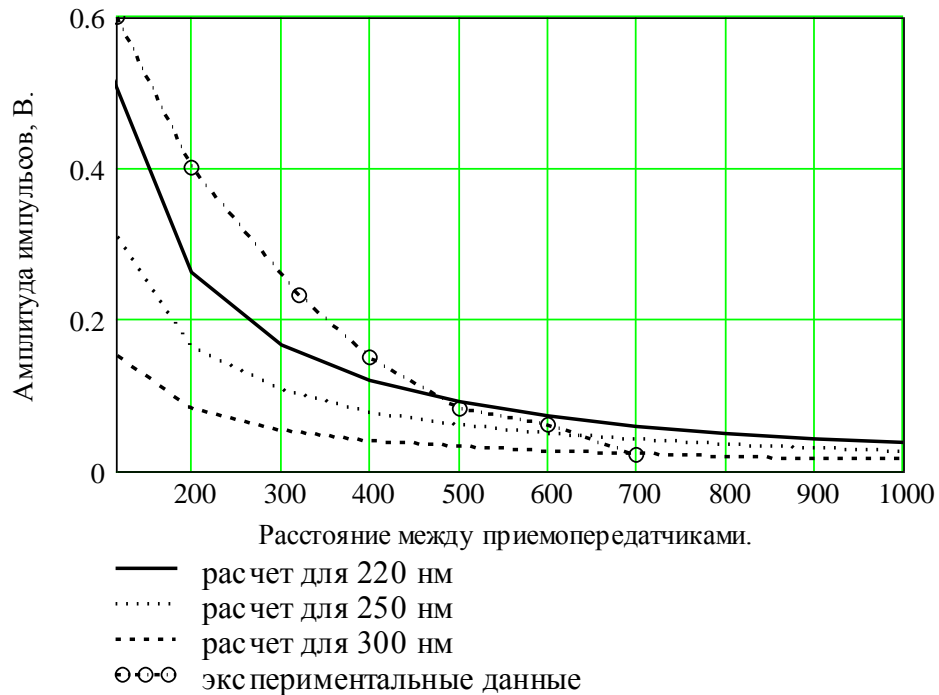


Рис23. Экспериментальная и расчетные зависимости от расстояния амплитуды импульсов на выходе приемника в канале с рассеянием.

Некоторое несовпадение экспериментальной и расчетных кривых объясняется тем, что в расчете не учитывалось аэрозольное рассеяние, так как отсутствуют данные об аэрозолях на трассе во время эксперимента (состав аэрозолей; концентрация, форма и размер частиц; индикатриса рассеяния).

При расстоянии между приемником и передатчиком 75 м и углах подъема передатчика $1^\circ - 15^\circ$ зарегистрирован сигнал обратного рассеяния. При углах подъема передатчика и приемника 3° и 10° соответственно амплитуда импульсов на выходе приемника составила величину 140 – 150 мВ. При этом угол рассеяния $\gamma = \alpha_{\text{пр}} + \alpha_{\text{пер}} = 173^\circ$.

Таким образом, анализируя характеристики флуктуации принятых сигналов, зависящих от изменения концентрации молекул Na – количество молекул в единице объема рассеяния ($2,55 \cdot 10^{19}$ для воздуха на уровне моря), которое синхронно изменяется с изменением акустического давления $P_{\text{акуст}}$ в инфразвуке можно определить наличие периодических и случайных изменений инфразвуковых колебаний в условиях, когда отсутствуют помехи от солнечного излучения.

3.6. Сопоставление результатов, полученных при реализации, с мировым уровнем

В основе Проекта под названием «Разработка и исследование методов повышения чувствительности инфранизкочастотной акустооптической технологии дальней регистрации акустических колебаний с применением прецизионных вибрационных источников и лазерных измерительных линий» лежит оригинальный авторский подход, соединивший в себе идею применения сейсмических вибраторов как высокоточных источников акустических волн с одной стороны и идею построения высокочувствительных к внешним акустическим полям измерительных лазерных линий. Следующая идея в реализации данного проекта связана с использованием методов синхронного накопления для измерения слабовыраженных амплитудно-фазо-частотных характеристик оптических колебаний, отражающих факт реакции на акусто-оптическое взаимодействие. Соединение этих идей и практическая их реализация позволили доказать и количественно оценить результаты акустооптического взаимодействия на инфранизких частотах. Доказано, что слабые акустооптические взаимодействия на инфранизких

частотах могут быть обнаружены благодаря применению тонких методов анализа оптических данных и высокоточной акусто-оптической аппаратуры.

Авторам неизвестны подобные работы за рубежом и в России и, по видимому, они носят пионерский характер.

3.7. Методы и подходы, использованные при реализации Проекта

Новизна полученных результатов predetermined постановкой задачи исследований и методикой их проведения, в основе которой лежит методы зондирования атмосферы одновременно инфранизкочастотными акустическими колебаниями сейсмического вибратора ЦВ-40 с высокими метрологическими силовыми и фазо-частотными характеристиками с одной стороны, а с другой с помощью оптического лазерного луча с высокой чувствительностью к внешним волновым воздействиям.

Акустооптическое преобразование (АОП) относится к числу слабых взаимодействий. Авторами был предложен и реализован метод синхронного накопления на основе алгоритма квадратурной обработки данных для обнаружения и измерения слабых вариаций амплитудно-фазо-частотных параметров оптических колебаний, обусловленных воздействием внешних акустических колебаний, на фоне влияния неоднородной атмосферы и солнечного излучения. Так например, по результатам натуральных экспериментов с использованием вибратора ЦВ-40 на удалении 930 м от него были на частотах излучения 8-10 Гц зафиксированы смещения лазерного пучка порядка 10^{-6} - 10^{-7} м. При этом акустическое давление в области пучка оценивается как 0.01 Па. Одновременно с высокой точностью оценены фазовые характеристики АОП. Такие величины достижимы лишь благодаря использованию технологии синхронного накопления, включающей в себя акустический источник, приемо-регистрирующую и программное обеспечение для анализа акусто-оптических данных.

В качестве одного из методов повышения чувствительности к АОП авторами в проведенных экспериментах доказано достоинство использования метода молекулярного рассеяния ультрафиолетовых импульсов лазерного излучения благодаря достижению объемного контроля над большим количеством молекул рассеивающей среды, пропорциональное $1/\lambda^4$ (релеевское рассеяние), одновременно при этом резко снижается уровень оптических помех от солнечного излучения при длине волны $\lambda < 0.29$ мкм благодаря защитному озоновому барьеру. Следующий подход к повышению эффективности АОП связан с использованием синхронного метода лазерного излучения высокостабильных потоков импульсов, что позволяет определять изменение коэффициентов преломления среды, коррелированное с акустической волной, а также высокочувствительного фазового метода за счет сравнения принятой частоты F_i импульсов с исходной частотой потока импульсов F_0 .

В качестве реализации метода повышения чувствительности к АОП была построена и испытана на базе обсерватории «Кайтанак» (республика Горный Алтай) двухлучевая лазерная измерительная линия для изучения акустооптических взаимодействий на инфранизких частотах. Экспериментально были оценены предельно достижимые дальности линии по критерию разрешающей способности оптической системы по углу с учетом выбранного типа фотоприемника.

В рассмотренном сочетании методов и средств изучения АОП созданная виброакустооптическая система отличается высокой метрологичностью, оригинальностью, новизной, что определяет перспективу проведения и развития исследований по акустооптическим взаимодействиям на инфранизких частотах.