

МБОУ "Гимназия №18 имени И.Я. Илюшина"

ПРОЕКТ

на тему:

**"ИНТЕРФЕРОМЕТР КАК ДЕТЕКТОР ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН НА
ПРИМЕРЕ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ"**

Выполнила:

ученица 11 класса гимназии №18
г. Королева
Тинькова Мария Игоревна

Руководитель:

Учитель физики
Шавыкина Ирина Александровна

Королев, 2019
СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАЗДЕЛ.....	6
1.1. Кластер спутников как детектор гравитационных волн.....	6
1.2. Интерферометр Майкельсона.....	10
2. ПРОЕКТНО-РАСЧЕТНЫЙ РАЗДЕЛ.....	12
2.1. Конструктивно-технологическая часть.....	12
2.2. Расчеты.....	14
2.3. Полученные результаты работы установки.....	15
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	18
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	20
Приложение.....	21

ВВЕДЕНИЕ

С детектированием гравитационных волн установками LIGO и VIRGO появилась возможность создания нового инструментария для регистрации событий, связанных с рождением нейтронных звезд и гамма-всплесков. Крупными источниками периодического характера являются сливающиеся черные дыры и сливающиеся нейтронные звезды.

Последние открытия констатировали существование как черных дыр, так и гравитационных волн. Вообще, гравитационные волны производят любые движущиеся массивные тела. Но частота многих гравитационных волн будет составлять мГц, что находится за пределами чувствительности LIGO и других существующих инструментов. Для детектирования таких низкочастотных волн нужны интерферометры с куда более длинным плечом, и работа над ними уже ведется.

Требуются дополнительные наблюдения, необходимо научиться достоверно извлекать сигнал из шума, обеспечить большую чувствительность. Главной целью гравитационно-волновой астрономии станет детектирование реликтовых гравитационных волн, возникших на самых первых, этапах жизни Вселенной, непосредственно в момент ее образования - Большого взрыва.

Этой темой занимаются много стран: своя установка есть и в России, в Баксанской обсерватории. Хотя лидерами сейчас являются две лаборатории - американский проект LIGO и итальянский детектор VIRGO. LIGO включает в себя два одинаковых детектора, разнесенных друг от друга на 3000 км. Наличие двух установок важно, т.к. сигнал будет считаться зарегистрированным, только если его увидят оба детектора одновременно. Однако, с двумя детекторами погрешность будет очень большой. Но вместе с VIRGO точность заметно повышается. Тройка разнесенных в пространстве детекторов позволит намного лучше восстанавливать положение источников на небесной сфере. Кроме того, в Японии сейчас строится аналогичная гравитационно-волновая антенна KAGRA, которая начнет работу через два-

три года, а в Индии, в районе 2022 года, планируется запустить детектор LIGO-India. В результате спустя несколько лет будет работать и регулярно регистрировать сигналы целая сеть гравитационно-волновых детекторов.

Все источники гравитационных волн, нужные для LIGO - это редкие по космическим меркам события. При этом LIGO еще не вышел на предельный уровень. Когда это случится - чувствительность инструмента возрастет примерно втрое, отчего этот проект даже получил отдельное название - Advanced LIGO - "продвинутый". Такой прибор сможет детектировать сигналы в три раза более слабой амплитуды, чем сегодня..

Чтобы построить детекторы, для регистрации длинноволновых (низкочастотных) сигналов, надо их вывести на орбиту. С этим как раз связано проектирование космического интерферометра LISA (Laser Interferometer Space Antenna) - лазерно-интерферометрическая антенна в космосе. Главной задачей будущего космического интерферометра считается поиск различных гравитационных волн. Несмотря на то, что волна уже была обнаружена, актуальность исследований в этой области не только не прекратилась, но стала еще более значимой в наблюдении за миром во всем разнообразии его проявлений.

В проекте представлена **лазерная установка, оригинальность и новизна** которой заключается в том, что она настроена на измерение акустического отклика, который идеально моделирует отклик от гравитационной волны. Естественно, уровень акустического сигнала на порядки выше, чем гравитационного. Именно поэтому вся установка может уместиться на столе.

Помимо возможности регистрации волн среднечастотного, а также низкочастотного диапазона, сфера применения такого интерферометра достаточно широка и интересна. Это будет указано в заключении.

В данном проекте **поставлена цель** - вычислить отклик детектора на акустическую волну и выявить возможность работы предложенной схемы регистрации сигналов широкого профиля и малой амплитуды.

Задачами проекта являются:

1. Расчет и создание макета интерферометра, регистрирующего волновые возмущения на примере акустического воздействия.
2. На примере экспериментального образца провести опытную проверку возможности регистрации волн низкочастотного диапазона.
3. Определение технических характеристик образца.
4. Проверить правильность результатов теоретических исследований.

Исследования в области создания оптимально чувствительного детектора **актуальны**: многие лаборатории мира бьются над этой проблемой. Конечно, их первоочередной задачей является создание оптимально чувствительного детектора к различным типам гравитационных волн, ведь поиск и изучение гравитационных волн - важнейшая задача астрофизики, так как эти волны являются носителями информации о том, что происходит во Вселенной.

1. НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАЗДЕЛ

1.1. Кластер спутников как детектор гравитационных волн

Чтобы построить детекторы, для регистрации длинноволновых (низкочастотных) сигналов, надо их вынести на орбиту. С этим как раз связано проектирование космического интерферометра LISA (Laser Interferometer Space Antenna) - лазерно-интерферометрическая антенна в космосе. Это совместный проект Европейского космического агентства (ESA) и Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США (NASA) (рис. 1). Три космических корабля образуют вершины равностороннего треугольника и должны создать двухлучевой интерферометр с длиной каждого плеча от одного до пяти миллионов километров. Роль свободных масс играют 6 зеркал, расположенных на трех спутниках, находящихся на специальных орбитах вокруг Земли.

Из-за финансовых проблем пришлось проект переделать, хотя удалось сохранить основные технические характеристики и не превысить бюджет. Измененный проект получил название NGO - New Gravitational wave Observatory. Но, после конкурса проектов в ESA, из трех выбирали один. И проект NGO отвергли.

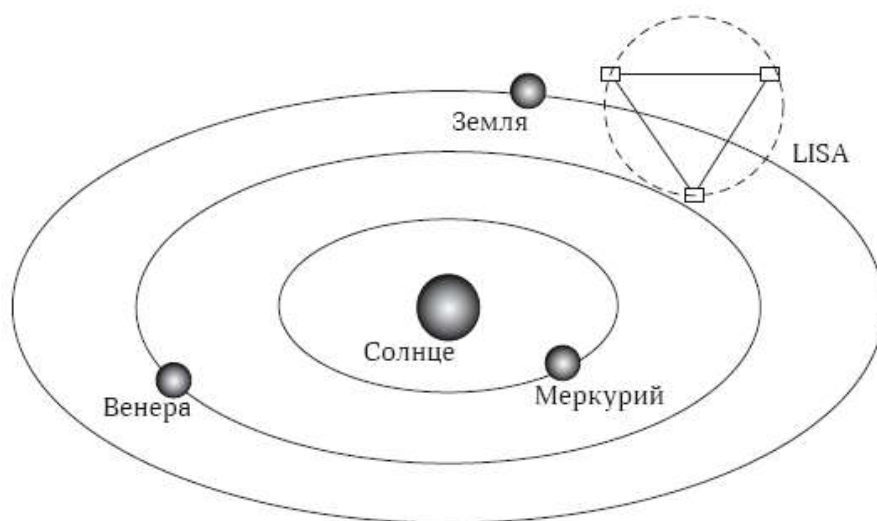


Рис. 1. Схема проекта LISA

Проектная чувствительность LISA/NGO перекрывает сигнал от двойных звезд в нашей Галактике. В отличие от слияния компактных звезд, или от вспышек сверхновых, которые происходят "одноразово" и редко (на эти события в основном нацелен проект Advanced LIGO), двойные звезды излучают непрерывно, сигнал должен быть всегда.

И так - LISA состоит из трех спутников, которые образуют треугольник. Лазерные лучи длиной 5 миллионов км "соединяют" их друг с другом. Вся эта система будет обращаться вокруг Солнца на расстоянии приблизительно 50 миллионов км от Земли. Сравнивая лазерные лучи, каждый спутник будет выстраивать свою интерференционную картину (Распределение интенсивности света, получающееся в результате интерференции, в месте ее наблюдения). Когда воздействие гравитационной волны (в виде искажение пространства) вызовет возмущение лазерных лучей, картина будет меняться, и спутники зарегистрируют изменения (рис. 2).

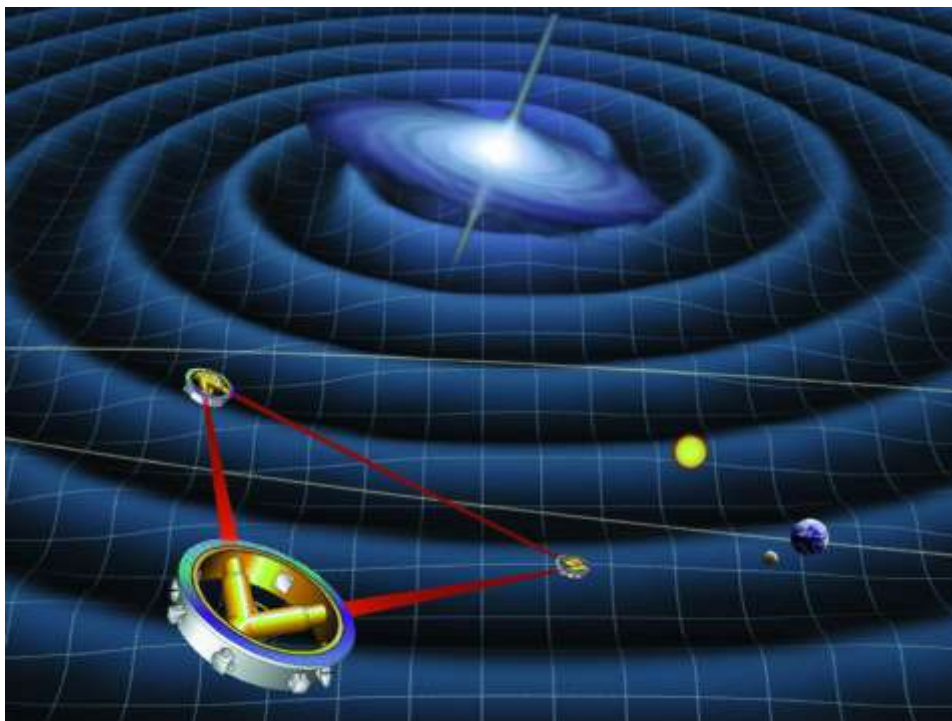


Рис. 2. Схема работы LISA

LISA кроме сверхточного измерения смещения тестовых масс, должен еще измерять с очень высокой точностью расстояние между спутниками.

Двигаясь по орбите, треугольник из зондов будет менять свою плоскость и сможет фиксировать гравитационные волны с разных направлений (рис. 3).

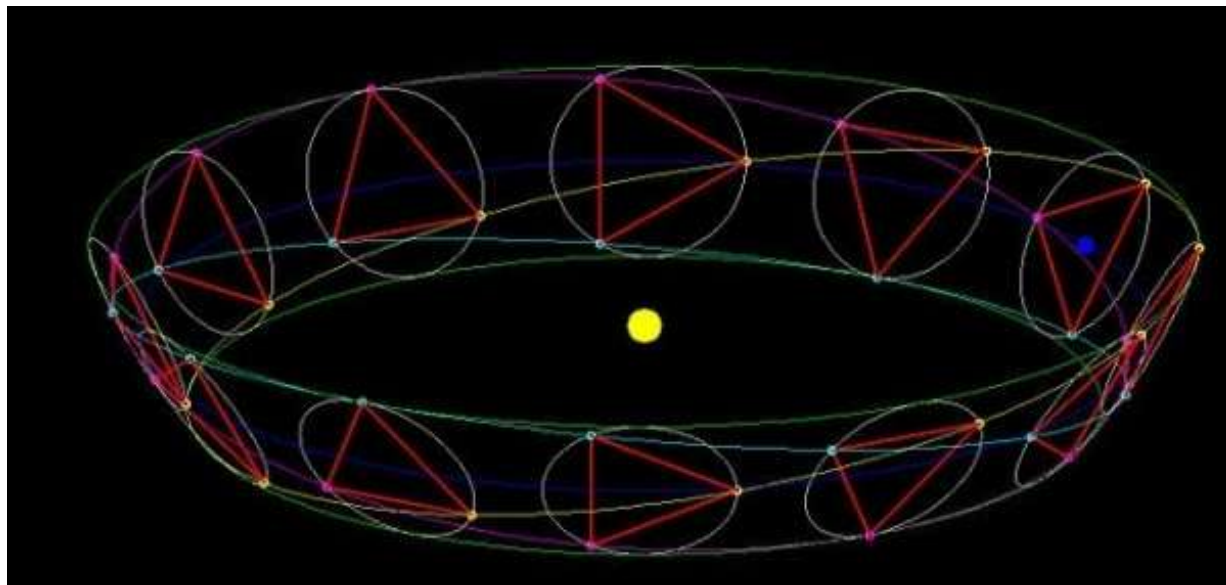


Рис. 3. Движение по орбите.

Также, чувствительность LISA может перекрывать сигнал от процессов, связанных со сверхмассивными черными дырами. Но если частота меньше чем 10^{-4} Гц - это не доступно для LISA.

Свое мнение по этому поводу высказал космолог из ГАИШ Михаил Сажин. В работе "Кластер спутников как детектор гравитационных волн" М.В. Сажин рассмотрел детектирование гравитационных волн кластером спутников. Он анализировал воздействие только монохроматической волны, так как, по его мнению, это упрощает задачу, не изменяя "качественно результаты". В заключении М.В. Сажин написал: "Таким образом, мы показали, что максимальный отклик на гравитационные волны от двойной системы достигается при разности углов $\Delta\phi = 90^\circ$. Известно, что для космического детектора LISA выбран угол между плечами 60° . Такое

значение $\Delta\phi$ приводит к отклику несколько подавленному по сравнению с максимальным, хотя разница невелика."¹

Если LISA не сможет помочь в изучении эпохи до Большого взрыва, то существует проект его преемника - Big Bang Observer (BBO) - Наблюдатель Большого взрыва. Его цель - наблюдение за гравитационными волнами со времен Большого взрыва. BBO, возможно, более чувствителен к источникам LIGO и LISA из-за мощных лазеров и взаимосвязи сигналов от различных интерферометров.

Big Bang Observer - совокупность 4 инструментов, каждый из которых составлен из 3 спутников, которые управляются в треугольной модели. Два из треугольников будут как бы друг на друге, а два других - вдоль орбиты Земли. Но из-за сверх дорогостоящего проекта существуют проблемы финансирования, и запуск откладывается на многие десятилетия.

Трудность поиска гравитационных волн в низкочастотных областях от 10^{-4} Гц до 10^{-8} Гц заключается в том, что необходимо иметь две "пробные частицы". Для таких волн их период порядка 3 лет, тогда и пробные частицы должны находиться на расстоянии трех световых лет. В качестве таких детекторов можно использовать астрономические объекты, например пульсары, у которых стабильный период пульсаций.

Конечно же, действие гравитационных волн на пути импульсов приводит к "растяжению" и "сжатию" расстояний между ними. Исследователи будут фиксировать изменение времени прихода импульсов по сравнению со стандартным. Гравитационная волна с амплитудой 10^{-15} приводит к смещению импульсов, отстоящих друг от друга на расстоянии 3 года, на добавочное время примерно в 100 наносекунд. Но это смещение пока невозможно зарегистрировать, т.к. не хватает точности земных часов. Чтобы зарегистрировать эти эффекты, необходимо создать новую шкалу времени. Возможно, что именно **пульсары** должны стать стандартными часами - на

¹ Сажин М.В. Кластер спутников как детектор гравитационных волн / М.В. Сажин // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. - 2016. - №3. - С.78-83.

длительных промежутках времени, чья точность выше точности земных часов.

1.2. Интерферометр Майкельсона

В интерферометре Майкельсона используется явление интерференции в тонких пленках. Явление интерференции в установке осуществляется способом деления амплитуды волны.

На платформе находится плоская покрытая серебром пластинка (А), расположенная под углом 45° к направлению распространения лучей, А также два взаимно перпендикулярных зеркала С и D (рис.4).

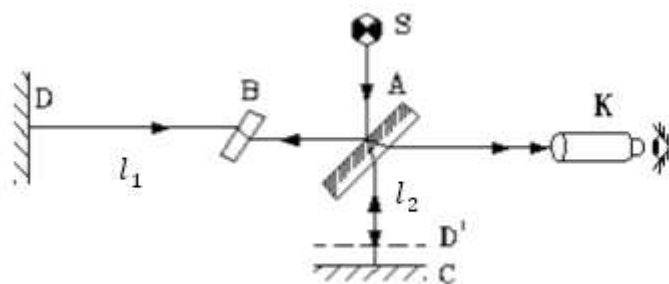


Рис. 4. Интерферометр Майкельсона

Пластинка В является вспомогательной, она компенсирует разность хода лучей. Световые волны распространяются от источника света S. Одна часть световых волн отражается от серебряной поверхности пластины А, а другая часть проходит сквозь эту же пластину. Таким образом, происходит процесс расщепления волны света на две когерентные волны.

Волны, проходящие через делитель, отражаются от зеркал С и D. Отраженные волны снова частично отражаются, а частично проходят сквозь делитель. Эти волны могут интерферировать на участке АК. Такая картина наблюдается в зрительную трубу. Так, на пластинке А происходит деление амплитуды, фронт волн на ней сохраняется. Изменяется только направление движения.

Если плечо DA развернуть на 90^0 , то зеркало D попадет в положение D' . Между D' и C появляется промежуток, который может быть подобен тонкой пленке. В том случае, если зеркала C и D строго перпендикулярны, то наблюдаются полосы равного наклона, которые представляют собой круги. Зрительная труба в таком случае должна быть настроена на бесконечность. Если зеркала C и D не совсем перпендикулярные, промежуток между ними уподобляется клину, то появляются полосы равной толщины в виде прямых полос. Зрительную трубу в этом случае фокусируют на посеребренную грань делителя.

Интерферометр Майкельсона применяют для поиска гравитационных волн. Он также сыграл огромную роль в исследовании верхнего атмосферного слоя, определении температур и ветров.

Всем известен эксперимент Майкельсона-Морли. Хотя это была неудачная попытка демонстрации влияния гипотетического эфирного ветра на скорость обычного ветра, она вдохновила на создание специальной теории относительности.

2. ПРОЕКТНО-РАСЧЕТНЫЙ РАЗДЕЛ

2.1. Конструктивно-технологическая часть

Установка состоит из:

- Платформы (тяжелая доска 700x700x20);
 - Источника света (1): красный лазерный диод (квантовый излучатель света LM650.3.S5) ($\lambda \approx 650$ нм);
 - Делителя (2) (полупрозрачное зеркало со светопропускаемостью 50%), установленный на регулируемую по трем осям платформу;
 - Зеркала (3), жестко установленного на платформу без возможности регулировки, формирует плечо $l_1 \approx 0,4$ м;
 - Зеркала (4), установленного на регулируемую платформу, формирует плечо $l_2 \approx 0,4$ м;
- Равенство плеч ($l_1 = l_2$) достигается за счет микрометрического винта, который обеспечивает точность юстировки 10^{-4} м, на зеркале (4).
- Фотоприемника (5) (BPW34 фотодиод): обеспечивает регистрацию света и переводит его в фототок, фиксируемый звуковой картой компьютера через микрофонный вход;
 - Акустического динамика (6) (закреплен на зеркале (3)): воспроизводит имитацию воздействия гравитационных волн. Сигнал на динамик подается со звуковой платы компьютера. Также использован усилитель сигнала (SAS0022-20) с коэффициентом $k = 20$, получающий питание от батареи "крона" 9В (7).

Параметры сигнала:

Сгенерирован переменный сигнал нарастающей частоты 1кГц до 10кГц, содержащий восемь секунд тишины и одну секунду воздействия нарастающей амплитуды от нуля до максимального значения.

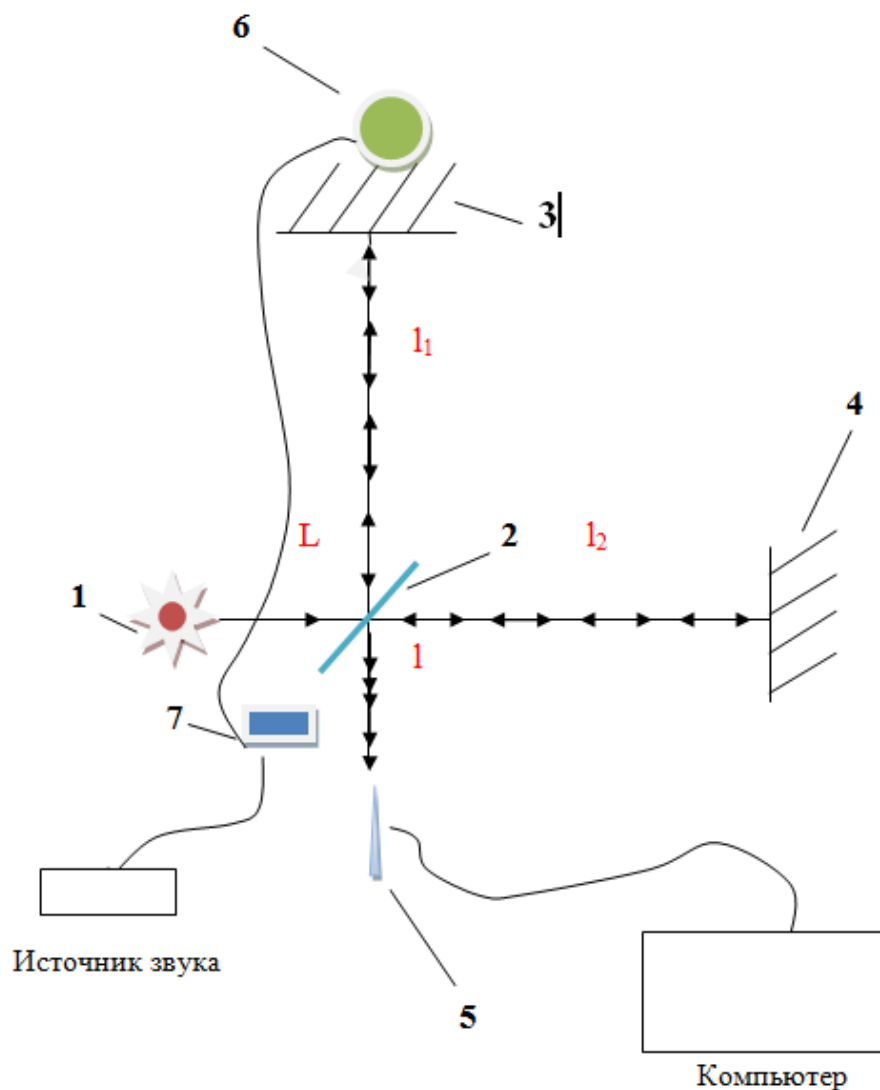


Рис. 5. Схема установки

Пучок, генерируемый лазером (1) (рис. 5) расщепляется светоделителем (2) на два пучка одинаковой интенсивности, попадая на зеркала (3, 4). Отраженные от зеркал пучки смешиваются тем же светоделителем (2), в результате чего возникают условия для интерференции при достижении равенства плеч $L_1=L_2$, формируется интерференционная картина. Фотоприемник (5) обеспечивает регистрацию света и переводит его в фототок, фиксируемый звуковой картой компьютера. Звуковой сигнал подается со звуковой платы компьютера на акустический динамик (6), закрепленный на неподвижном зеркале (3) для воспроизведения имитации воздействия гравитационных волн. Акустические колебания динамика (6)

передаются на зеркало (3), в результате чего оптическая длина луча L_1 испытывает периодические изменения. Это приводит к соответствующим периодическим изменениям интерференционных максимумов и минимумов, регистрируемых фотодиодом, что в свою очередь влияет на фототок, регистрируемый компьютером. При этом усилитель SAS0022-20, получающий питание от батареи "крона" 9В (7) значительно улучшает сигнал.

2.2. Расчеты

Общая формула:

Электромагнитные волны излучаемые лазером характеризуются синфазными колебаниями электрического и магнитного полей. Например, для электрической компоненты имеем,

$E = E_0 \cos(kx - \omega t)$ где: x - координата, ω - круговая частота, k - волновое число

Расчет для конкретной установки:

$x_1 = L + 2l_1 + l$ - оптический путь луча 1

$x_2 = L + 2l_2 + l$ - оптический путь луча 2

Первый луч: $E_1 = E_0 \cos(kx_1 - \omega t)$

Второй луч: $E_2 = E_0 \cos(kx_2 - \omega t)$

$E_1 + E_2 = E_0 (\cos(kx_1 - \omega t) + \cos(kx_2 - \omega t)) =$

$= 2E_0 \cos\left(\frac{k(x_1 + x_2) - 2\omega t}{2}\right) \cos\left(\frac{k(x_1 - x_2)}{2}\right)$

Обозначим $2E_0 \cos\left(\frac{k(x_1 + x_2) - 2\omega t}{2}\right) = A$ (суммарная волна), тогда, подставляя

x_1 и x_2 в выражение, получим

$E_1 + E_2 = A \cos\left(\frac{k(L + 2l_1 + l + L + 2l_2 + l) - 2\omega t}{2}\right) = A \cos(k(L + l_1 - l_2) - \omega t)$

При $L_1 - L_2 = \pi n$, где n - любое целое число, возникает условие интерференционного максимума. На практике интерференционное условие достигается настройкой микрометрического винта.

Данные установки:

$$\lambda \approx 650 \text{ нм}$$

$$l_1 = l_2 = 0,4 \text{ м}$$

При генерации акустических волн с частотой Ω возникает изменение длины плеча $L1 \rightarrow L1 + \Delta l_1 \cos(\Omega t)$, где

Δl_1 - амплитуда передаваемых колебаний является малой величиной $\ll L1$.

Конкретное ее значение неважно для регистрации отклика на звук.

Δl_1 - отклик зеркала (3) на действие динамика (6)

Значение Δl_1 - мало в следствие того, что зеркало (3) массивно и жестко закреплено на платформу.

Ω - частота акустической волны, имитирующая эффект от гравитационной волны.

I_{cp} - ток электронов на фотоэлектронном умножителе (ФЭУ)

Воздействию гравитационной волны

Находим ($l_1 - l_2$):

$$l_1 \rightarrow l_1 + \Delta l_1 \cos(\Omega t) \Rightarrow$$

$$(l_1 - l_2) = l_1 + \Delta l_1 \cos(\Omega t) - l_1 = \Delta l_1 \cos(\Omega t) \Rightarrow$$

$E_1 + E_2 = A \cos(k \Delta l_1 \cos(\Omega t))$, Поскольку ФЭУ регистрирует интенсивность света (пропорциональна квадрату амплитуды E) следовательно ток фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) изменяется по закону :

$I = I_{cp} (\cos(k \Delta l_1 \cos(\Omega t)))^2$. Регистрация этого переменного тока позволяет определить частоту его колебаний, а значит и расшифровать характеристики исходного акустического возмущения (амплитуду и частоту).

2.3. Полученные результаты работы установки

В качестве референсного акустического сигнала программно сгенерирован сигнал переменной частоты нарастающей от 1 кГц до 10 кГц и линейно возрастающей амплитуды (рис 6).

Установка зарегистрировала сильно зашумленный сигнал (около 80% шума, в том числе белого шума) и около 20% полезного сигнала. С помощью программы PhViewer удалось выделить полезный сигнал в предположении,

что шум в основном имеет амплитудно-частотные характеристики белого (рис.7). На графике серые вкрапления - шум после обработки, а яркая белая линия - полезный сигнал. После масштабирования он в точности повторяет исходный профиль акустического (рис.6). Для выявления полезного сигнала использовалась программа обработки сигналов.

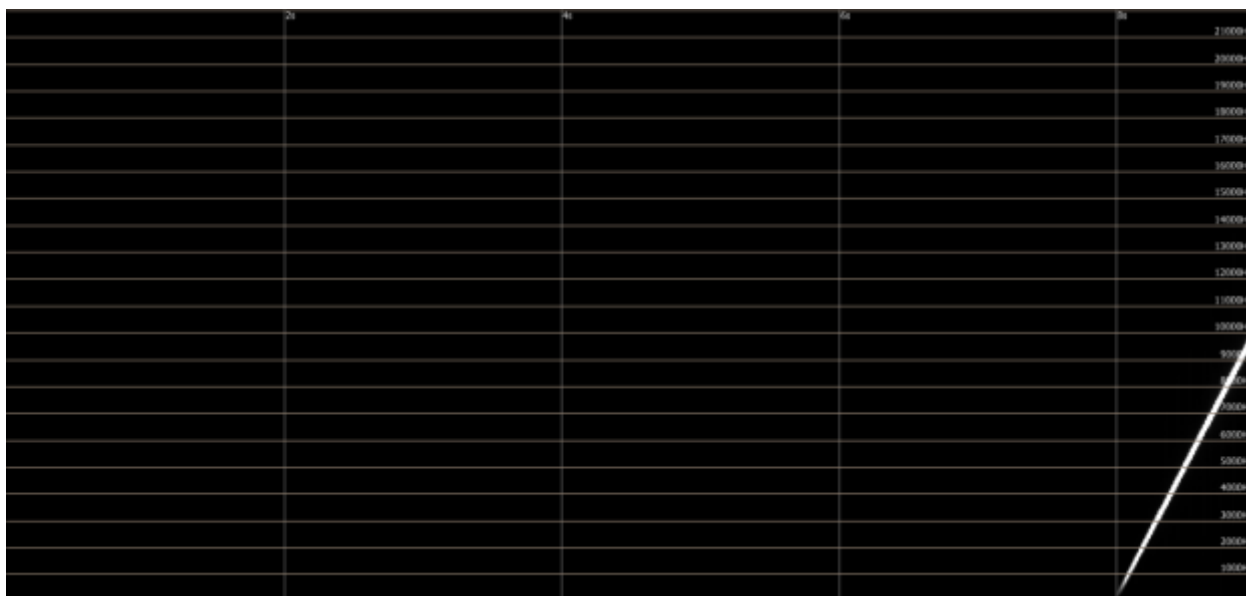


Рис. 6. Профиль акустического сигнала

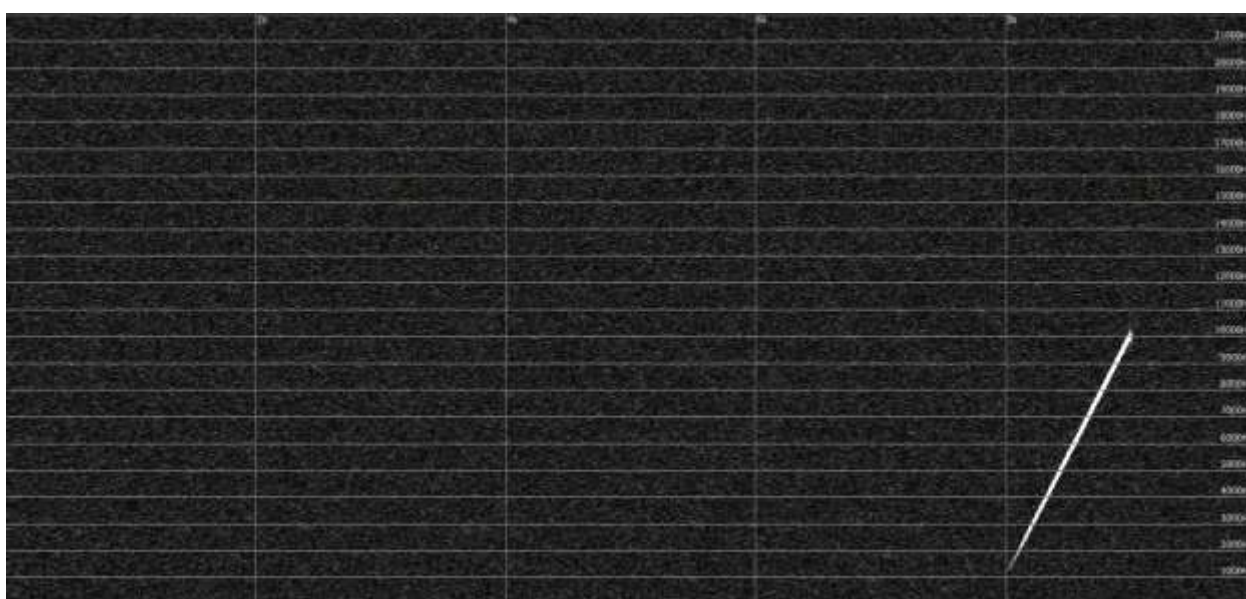


Рис. 7. Полезный сигнал

В результате эксперимента доказана работоспособность установки в заданном частотном диапазоне от 1кГц до 10 кГц.

Согласно данным VIRGO и LIGO длина плеч интерферометра должна быть около 1 млн. км., поэтому понятно, что установка в миниатюрном варианте не может решать глобальные проблемы.

Несмотря на это были произведены расчеты, которые позволили в бытовых условиях создать установку, и в результате многочисленных экспериментов на примере акустических волн была выявлена возможность регистрации волн среднечастотного, а также низкочастотного диапазона. Расшифровка низкочастотных сигналов (до 100 Гц) сильно осложняется существенным увеличением шумов и изменением их АЧХ (амплитудно-частотных характеристик) в сравнении с белым шумом. Тем не менее, даже для таких сигналов выделение полезного сигнала представляется технически возможным.

Доказана работоспособность указанной схемы для регистрации сигналов широкого профиля и малой амплитуды. В частности, реакция установки на сверх малые возмущения позволяет использовать ее для регистрации сейсмических возмущений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тема детектора для регистрации низкочастотных сигналов гравитационных волн напрямую связана с космической областью.

Проектирование и создание космического интерферометра - мечта многих лабораторий мира. Регистрация гравитационных волн позволит рассматривать Вселенную и изучать космические катаклизмы.

Проектная работа достигла своей цели. Были решены поставленные задачи. Экспериментальный образец может регистрировать волны низкочастотного диапазона. Правильность результатов теоретических исследований предоставили возможность рассчитать и создать макет-установку регистрирующую волновые возмущения на примере акустического воздействия в заданном частотном диапазоне от 1кГц до 10 кГц.

Схема для регистрации сигналов широкого профиля и малой амплитуды подтвердила свою работоспособность, а реакция установки на сверх малые возмущения позволяет использовать ее для регистрации сейсмических возмущений.

Данная установка оригинальна, т.к. она настроена на измерение акустического отклика. Поскольку уровень акустического сигнала на порядки выше гравитационного, это позволило провести опыты в бытовых условиях.

Итак:

1. Акустический отклик идеально моделирует отклик от гравитационной волны **переменной амплитуды и частоты.**

2. Выявлена возможность регистрации волн среднечастотного, а также низкочастотного диапазона. **Установка с большой точностью позволяет расшифровать характеристики внешнего акустического возмущения, особенно в среднечастотном диапазоне.**

3. Реакция установки на сверх малые возмущения позволяет использовать ее и для регистрации сейсмических возмущений.

Лазерные интерферометры, регистрирующие волновые возмущения на примере акустического воздействия могли бы применяться в различных областях, например, в геофизике (регистрация сейсмических возмущений). Если создать точную чувствительную установку, то вполне возможно, что ее можно будет использовать и в космической области (помощь в получении данных о спускаемом аппарате космического корабля при входе в атмосферу, либо падения небесного тела и т.д.).

В целом, тема создания интерферометров нового поколения не потеряет свою актуальность даже в далеком будущем. Предстоят многие годы поиска и реализации (из-за высокой стоимости проекта) сверхчувствительного детектора. Например, продолжаются работы над проектом с кластером спутников. Так как поиск и изучение гравитационных волн - важнейшая задача астрофизики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калёб Шарф. Двигатели гравитации. Как черные дыры управляют галактиками, звездами и жизнью в космосе. - М.: Бином. Лаборатория знаний, 2017. - 262 с.
2. Потюпкин А.Ю., Данилин Н.С., Селиванов А.С. Кластеры малоразмерных космических аппаратов как новый тип космических объектов / А.Ю. Потюпкин, Н.С. Данилин, А.С. Селиванов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. - 2017. - Т. 4. - № 4. - С. 45-56.
3. Руденко В.Н. Поиск гравитационных волн / В.Н. Руденко - М.: Век 2, 2007. - 64 с.
4. Сажин М. В. Кластер спутников как детектор гравитационных волн М. В. Сажин // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. - 2016. - № 3. - С.78-83.
5. Чернин А.Д. Звезды и физика / А.Д. Чернин - М.: URSS, издание 2 - е, 2018. - 176 с.
6. Шишкина А.Ф., Боронин Е.В. Обнаружение гравитационных волн: история и современность / А.Ф. Шишкина, Е.В. Боронин // Теория. Практика. Инновации. - 2016.

Электронные ресурсы (интернет):

1. Иванов Игорь. Гравитационные волны - открыты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL:
https://elementy.ru/novosti_nauki/432691/Gravitatsionnye_volny_otkryty
2. Копейкин Сергей: почему открытие гравитационных волн так важно [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL:
<https://naked-science.ru/article/interview/sergey-kopeykin-pochemu-otkrytie>

3. Постнов Константин. Гравитационные волны: история изучения и открытие LIGO - 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL:

<https://postnauka.ru/faq/59492>

4. Попов Сергей. Точка зрения: Что изменит открытие гравитационных волн - 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL:

<https://postnauka.ru/talks/59808>

5. https://spravochnick.ru/fizika/optika/interferometr_maykelsona/

Приложение

Ключевые слова: детекторы гравитационных волн, детектирование, волновые возмущения, гравитационные волны, кластер, гравитационное линзирование.