

Перспективные направления в области создания детекторов гравитационных волн

И.П. Охрименко, Н.Н. Кольчевский, П.В. Петров

Белорусский государственный университет
220030, Республика Беларусь, г. Минск,
пр. Независимости, 4

Аннотация – В работе рассмотрены основные принципы детектирования гравитационных волн. Действующие детекторы гравитационной волны представляют собой модернизированный интерферометр Майкельсона – LIGO-детектор. Одна из технических задач LIGO-детектора — это подавление вибраций в системе и обеспечение высокой статичности отражающих зеркал. Предложено исследовать особенности LIGO-детектора с подвижными зеркалами. Разработано программное обеспечение LIGO-RM, моделирующее работу LIGO-детектора и позволяющее исследовать его параметры и возможности. Основной задачей моделирования является исследование сигнала детектора гравитационных волн с осциллирующими зеркалами. В программе имеется графический интерфейс, позволяющий интерактивно управлять характером движения отражающих зеркал и наблюдать изменения сигнала детектора. LIGO-RM моделирует наличие гравитационной волны заданного типа и позволяет наблюдать ее влияние на результат работы интерферометра LIGO в интерактивном виде и в виде численного результата. Выполнен ряд численных экспериментов, и показаны сигналы детектора при наличии и отсутствии колебаний зеркал. Обсуждаются результаты расчетов и возможность регистрации гравитационных волн с помощью LIGO-детектора с подвижными зеркалами.

Ключевые слова – гравитационные волны; LIGO; подвижные зеркала; интерферометр; детектор гравитационных волн.

Введение

Гравитационные волны – это изменения гравитационного поля (поля тяготения), распространяющиеся в пространстве с фундаментальной скоростью. Гравитационные волны излучаются массами, движущимися с переменным ускорением. Воздействуя на тела, гравитационные волны должны вызывать относительное смещение их частей (деформацию тел). На этом явлении основаны методы обнаружения гравитационных волн. Однако гравитационные волны невероятно слабы – как из-за малой величины гравитационной силы, так и потому, что гравитационные волны имеют тип квадрупольного излучения, которое намного слабее, чем дипольное излучение, характерное для электромагнетизма.

Рассмотрим хронологию возникновения базовых идей о гравитационных волнах (рис. 1). Исаак Ньютон задавался вопросом о природе взаимодействия тел без прямого контакта между ними и без посредства чего-либо. Касательно этой проблемы в 1865 г. в своей публикации в заметке «о гравитационном притяжении» Джеймс Клерк Максвелл рассуждает об аналогии гравитации с электромагнетизмом и, основываясь на принципе единообразия природы, обозначает вопрос о том, что гравитационное притяжение между объектами осуществляется посредством поля, как и в слу-

чае теории электромагнитного взаимодействия [1]. В 1893 г., Оливер Хэвисайд получил аналитическое решение гравитационного аналога уравнений Максвелла в виде волн [2; 3]. Он продемонстрировал, что данные волны обладают конечной скоростью распространения. Работа французского физика Генри Пуанкаре содержит главу «Гипотеза гравитации» [4]. В данной главе, Пуанкаре рассматривает изменения ньютоновского гравитационного взаимодействия после применения преобразований Лоренца, которые на то время использовались, чтобы описать изменения ЭМ-поля для наблюдателей, движущихся с различной скоростью.

Пуанкаре был первым физиком, который применил термин «гравитационные волны» (*Ondes gravifiques*) к распространяющимся изменениям гравитационного поля. Он провел работу, схожую с Хэвисайдом, однако уже в рамках релятивизма. Пуанкаре предположил, что будет некое замедление (можно сделать вывод о том, что Пуанкаре предполагал, что это физическое поле и оно будет основано на принципе близкодействия) в распространении гравитационного поля (действие изменения гравитации и эффект) ввиду конечности фундаментальной скорости. В 1911 г. Эйнштейн опубликовал работу [5], в которой сделал предположение, что скорость света переменна в гравитационном поле, что дало толчок работам учено-



Рис. 1. Ученые внесшие вклад в теорию гравитационных волн
Fig. 1. Scientists who made a huge impact on the gravitational wave theory

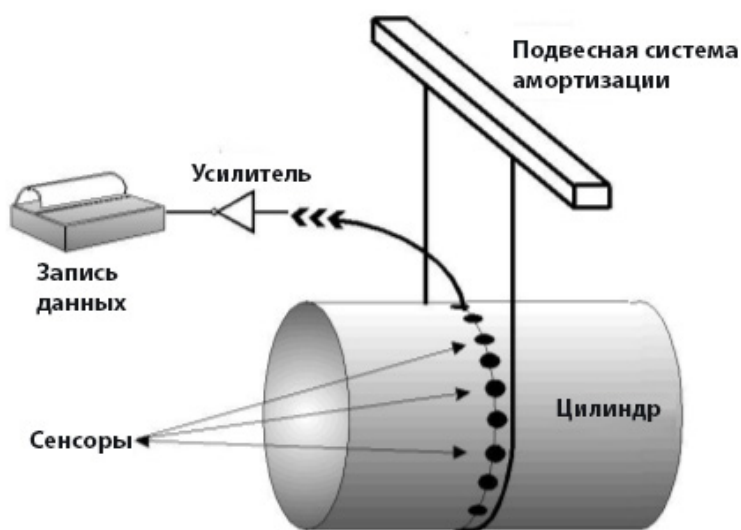


Рис. 2. Схема детектора ГВ механического типа, известного как «Вебер бар», и фотография Дж. Вебера с разработанным им первым детектором в 1960-е
Fig. 2. Scheme of GW detector «Weber bar». Photoshoot of J. Weber and the detector he designed in 60's

го Макса Абрахама (1875–1922), который взял это утверждение за основу. В 1912 г., Абрахам опубликовал теорию гравитации, в которой он изменил специальную теорию относительности (СТО) и использовал идею переменной скорости света, рассматривая гравитационное поле как скалярное поле, изменяющееся в пространстве и времени [6]. В своей теории Абрахам считал, что волны являются продольными. В схожем направлении с Абрахамом работал ученый Густав Ми, который исследовал идею «единого поля», и его труд также включал в себя теорию гравитации. Он был последователем СТО и постоянства скорости света [7; 8].

Ключевой работой являются труды финского физика Гуннара Нордстрема, который первым показал, что вещество влияет на геометрию пространства-времени, и создал релятивистски-совместимую теорию гравитационного поля [9]. В доступных документах Гуннара явных упоминаний о термине гравитационных волн не обнаружено, но его теория предсказывает их, так как уравнение поля в ней является уравнением для

поперечных волн (после будет доказано, что ГВ – поперечные волны). В 1918 г. Эйнштейн публикует вторую работу по ГВ [10]. В общей теории относительности (ОТО) гравитация определяет решетку в пространстве-времени. Эйнштейну требовалось 10 уравнений для описания всего поля. Математические объекты, необходимые для этого, называются тензорами, что делает ОТО более сложной, чем векторная теория электромагнетизма Максвелла или скалярные теории гравитации.

В конце 1950-х годов совместная работа физиков Германа Бонди, Феликса Пирани, Ивора Робинсона и польского ученого Анджея Траутмана окончательно установила реальность гравитационных волн в ОТО [11–18]. Потребовалось еще 60 лет теоретического, экспериментального и инструментального прогресса, прежде чем ученые смогли непосредственно обнаружить гравитационные волны и исследовать их свойства в реальном мире [19]. Реализация гравитационных детекторов, действительно способных зарегистрировать гравитационные волны, стала возможной лишь в XX веке.

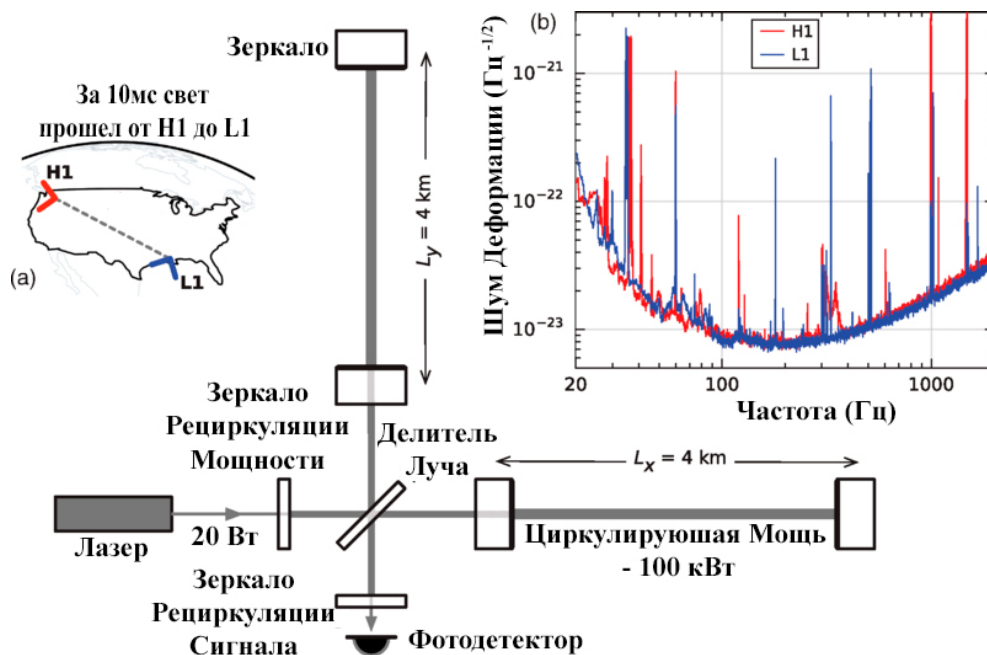


Рис. 3. LIGO-обсерватория, ее местоположение и график чувствительности
Fig. 3. LIGO observatory, its location and sensitivity curves

1. Гравитационно-волновой детектор

Гравитационно-волновым детектором считается любая система пробных масс (тел) или протяженное тело и сенсор, реагирующие и записывающие малые относительные смещения масс или силы, которые их вызвали. Гравитационная волна, распространяясь с фундаментальной скоростью света, изменяет свойства кривизны пространства, воздействуя на тела. Амплитуда возмущений, вызванных гравитационной волной от реальных астрономических источников, обратно пропорциональна расстоянию до источника и оказывается малой (порядка 10^{-21}).

Наибольшее распространение получили два типа наземных детекторов гравитационных волн:

1) массивный цилиндр длиной от 1 до 3 метров (рис. 2), регистрирующий низкочастотные механические колебания (Weber bar) – резонансный детектор [20];

2) лазерный интерферометр, регистрирующий сдвиг интерференционных полос – электромагнитный принцип [21].

Основной проблемой детекторов первого типа являются тепловые колебания, а в случае детекторов второго типа – сейсмические возмущения [22].

Первые попытки создания гравитационного детектора были предприняты Дж. Вебером из Университета Мэриленда. В 1965 г. Вебер построил детектор: цилиндрический стержень размером $1 \text{ м} \times 2 \text{ м}$ и весом 1,5 тонны, изготовленный из

твердого алюминия, который должен был резонировать на определенном наборе частот, будучи потенциально возбужденным прошедшей сквозь него гравитационной волной. Идея эксперимента заключалась в следующем: гравитационная волна сжимала и растягивала «стержень Вебера», вызывая вибрации, которые при совпадении с резонансной частотой стержня вызывали бы измеримые возбуждения. В 1969 г. Вебер объявил, что он обнаружил гравитационные волны на двух подобных установках, разделенных на 1000 км: одна в Чикаго и одна в Мэриленде [23]. Однако эти результаты не были воспроизведены другими экспериментальными группами, а амплитуда заявленных сигналов, по их теоретическим расчетам, была на несколько порядков выше, чем предсказано для предположительных астрофизических источников. В результате на сегодняшний день физическое сообщество подвергает сомнению, что полученные Вебером сигналы являются следствием гравитационных волн [24; 25]. Тем не менее экспериментальная работа и методы Вебера дали толчок данной области исследования. В частности, Райнер Вайс из Массачусетского технологического института (MIT) в 1972 г. написал 23-страничную заметку в одном из ежеквартальных информационных журналов Массачусетского технологического института, в которой впервые подробно описана экспериментальная установка и все источники шума лазерного интерферометра, способного обнаруживать и регистрировать гра-

Табл. 1. Параметры LIGO детектора после усовершенствования, оконченого в 2015 г.
 Table 1. LIGO parameters 2015

LIGO-параметры (2015 г.)	Значение
Длина плеч	3994,5 м
Добротность резонатора плеч	450
Тип лазера и длина волны излучения	Nd:YAG, $\lambda = 1064$ нм
Входная мощность	5–125 Вт
Поляризация	Линейная, горизонтальная
Материал зеркал	Плавленый кварц
Размер и вес зеркал	$\varnothing 34$ см \times 20 см, 40 кг
Радиус пучка ($1/e^2$) на входном и концевом зеркалах	5,3 см и 6,2 см
Радиус кривизны входного и концевого зеркал	1934 м и 2245 м
Размер и вес делителя луча	$\varnothing 37$ см \times 6 см, 14 кг
Асимметрия Майкельсона (Schnupp)	8 см
Длина и добротность селектора/фильтра мод лазера на входе	32,9 м (полный проход), 500
Длины рециркулирующих резонаторов мощности и сигнала	57,6 м и 56,0 м

витационные волны с амплитудой порядка $1 \cdot 10^{-21}$, что впоследствии станет основой лазерного интерферометра и гравитационно-волновой обсерватории (LIGO-детектор) [26].

LIGO (*Laser-Interferometer Gravitational-wave Observatory*) – крупнейшая в мире гравитационно-волновая обсерватория. LIGO-обсерватория построена в 2002 г. и состоит из двух детекторов второго типа, разнесенных на разные концы Соединенных Штатов Америки: один – в Ливингстоне, штат Луизиана, а другой – в Хэнфорде, штат Вашингтон (рис. 3). LIGO использует физические свойства света и самого пространства для обнаружения гравитационных волн. Проект финансируется Национальным научным фондом США и управляется совместными усилиями CalTech и MIT.

Связка LIGO-детекторов представляет собой 2 больших оптических интерферометра, разнесенных в пространстве на расстояние в 3,002 км. Они являются двумя самостоятельными детекторами, или «приемниками сигнала», которые используются совместно для корреляционного анализа и выделения слабого сигнала из шума (рис. 3), а также для определения направления источника гравитационных волн.

Каждый такой детектор представляет собой модернизированный интерферометр Майкельсона (рис. 3). Модернизация осуществлена за счет добавления резонаторов Фабри – Перо в каждое из плеч интерферометра для увеличения оптического хода луча. Интерферометр Майкельсона включает в себя:

- 1) источник – лазер;
- 2) делитель луча;

3) два перпендикулярных плеча, по которым распространяются лучи;

4) фотодиод, на котором два луча смешиваются обратно в один.

Идея эксперимента заключается в следующем: когда гравитационная волна проходит через детектор, растяжение и сжатие пространства заставляет плечи интерферометра попеременно удлиняться и укорачиваться в силу поляризации волны. То есть одно плечо интерферометра становится длиннее, а другое – короче, затем наоборот. По мере того как плечи интерферометров изменяют длины, лазерные лучи, перемещаясь через них, проходят различные расстояния, приводящие к фазовому сдвигу между лучами и образованию изменяющейся интерференционной картины. Анализ интерференционных полос используется в LIGO для обнаружения гравитационных волн [27].

Одной из главных особенностей LIGO-детектора является его размер. Длина плеч LIGO-интерферометра составляет $L = 4$ км каждое. Амплитуда ожидаемой гравитационной волны A определяется как относительное удлинение плеча dL интерферометра – $dL / L = A$. Таким образом, если $L = 4$ км и $dL = 10^{-16}$ см, то амплитуда ожидаемой гравитационной волны равна $A = 10^{-21}$ [28]. Технические характеристики детектора LIGO представлены в табл. 1. Более детальную информацию о технических характеристиках LIGO можно найти на интернет-сайте проекта [29].

Запуск обсерватории для наблюдений с 2002 по 2010 г. не дал достоверных результатов. После этого работа LIGO была приостановлена до 2015 г. для внедрения ряда усовершенствований.

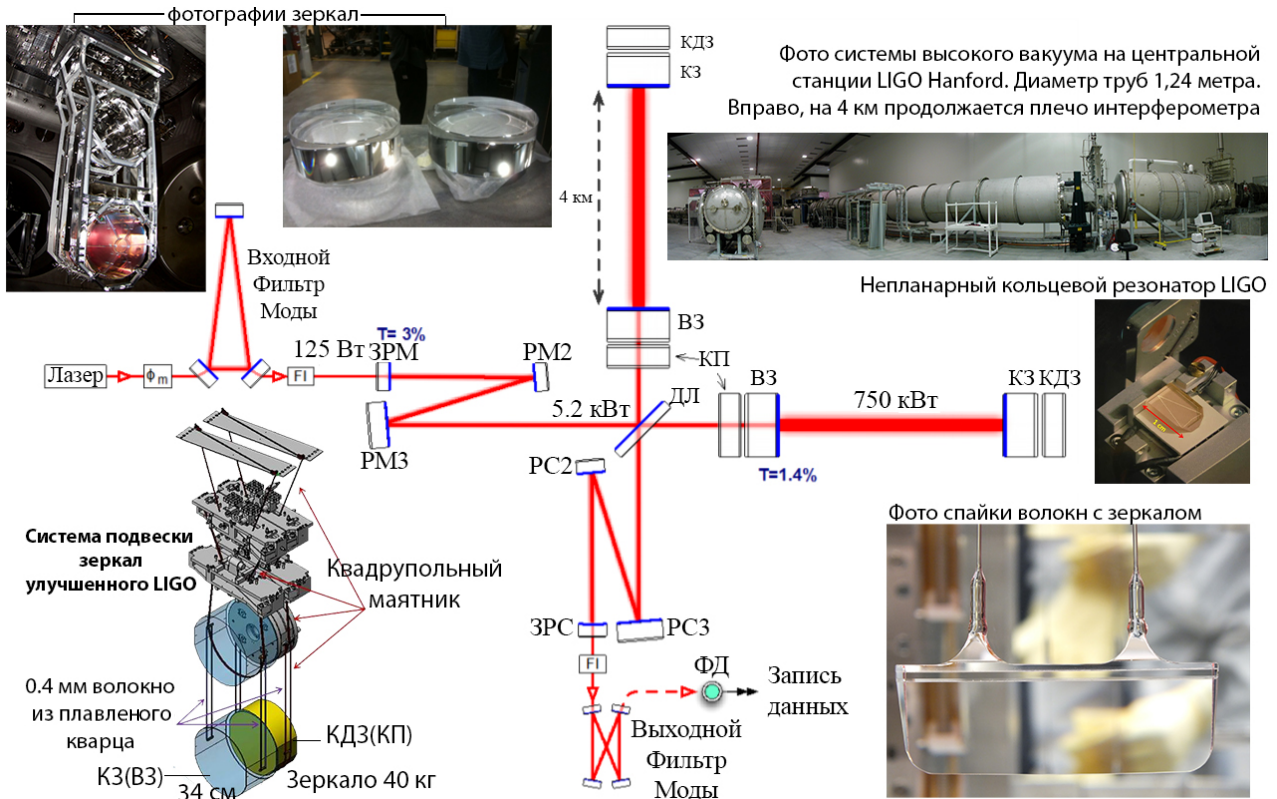


Рис. 4. Конфигурация улучшенного LIGO-интерферометра 2015г.: ϕ_m – фазовый модулятор; FI – изолятор Фарадея; КЗ – концевое зеркало; КДЗ – концевое дублирующее зеркало; ВЗ – входное зеркало; КП – корректирующая пластина; ДЛ – делитель луча; ЗРМ, PM2, PM3 – зеркала рециркуляции мощности; ЗРС, PC2, PC3 – зеркала рециркуляции сигнала; ФД – фотодиод
Fig. 4. Advanced LIGO configuration of 2015 year: ϕ_m – phase modulator; FI – Faraday isolator; KZ – end mirror; KDZ – end duplicate mirror; B3 – entrance mirror; KP – correction plate; DL – beam divider; ЗРМ, PM2, PM3 – power recirculation mirrors; ЗРС, RS2, RS3 – signal recirculation mirrors; PD – photodiode

Сумма улучшений составила \$ 200 млн. США, весь проект – \$ 620 млн. Практически сразу после запуска усовершенствованного детектора (рис. 4) 14.09.2015 была зарегистрирована первая гравитационная волна: *GW150914* [19; 30]. По состоянию на декабрь 2019 г. обсерватория LIGO произвела 3 запуска наблюдений, именуемых O_1 , O_2 и O_3 , и зарегистрировала 50 всплесков ГВ (рис. 5, 6) [31]. Плановые обслуживания и улучшения производились между запусками.

- O_1 : запуск состоялся с 12.09.2015 по 19.01.2016, зарегистрировано 3 ГВ, источниками которых являлись столкновения черных дыр (ЧД);
- O_2 : 30.11.2016 – 25.08.2017, 8 ГВ зарегистрировано, 7 – ЧД и 1 слияние бинарной нейтронной звезды (БНЗ) [32];
- O_3 : 56 регистраций ГВ;
- O_{3a} : 01.04.2019 – 30.09.2019;
- O_{3b} : 01.11.2019 – 27.03.2020 (*приостановлен в связи с COVID-19*).

Обсерватория LIGO сделала ряд фундаментальных физических открытий. Одним из таковых является измерение скорости распространения гравитационной волны в 2017 г. Согласно Эйнштейну,

эта скорость должна быть равна скорости света, и действительно, это то, что получили LIGO/Virgo и Fermi, с точностью более чем $1 \cdot 10^{-15}$. Это измерение стало возможным благодаря гравитационно-волновому наблюдению LIGO и Virgo во время слияния БНЗ в совпадении с коротким гамма-всплеском, который последовал менее чем через две секунды и был обнаружен с помощью обсерватории Fermi [33].

За «решающий вклад в детектор LIGO и наблюдение гравитационных волн» была присуждена Нобелевская премия 2017 г. в области физики трем ученым – это Кип Торн (CalTech), Райнер Вайсс (MIT) и Барри Бэриш (CalTech) [34].

На сегодняшний день функционируют 3 гравитационно-волновые обсерватории: LIGO (USA), Virgo (Italy) и KAGRA (Japan) [35]. Совместный запуск трех обсерваторий планируется на 2020–2021 гг. [36]. Детекторы LIGO, Virgo и KAGRA относятся ко второму поколению ГВ-детекторов. В настоящее время активно ведутся разработки детекторов третьего поколения, а также проектируются космические ГВ-обсерватории (табл. 2, рис. 7).

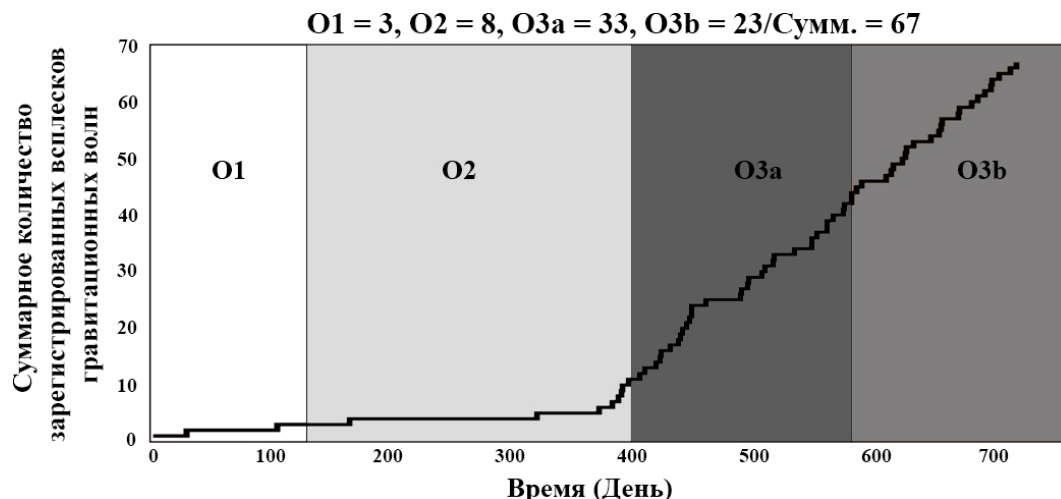


Рис. 5. Общее количество зарегистрированных событий ГВ с момента запуска обсерватории
 Fig. 5. Plot of GW events since all observational runs

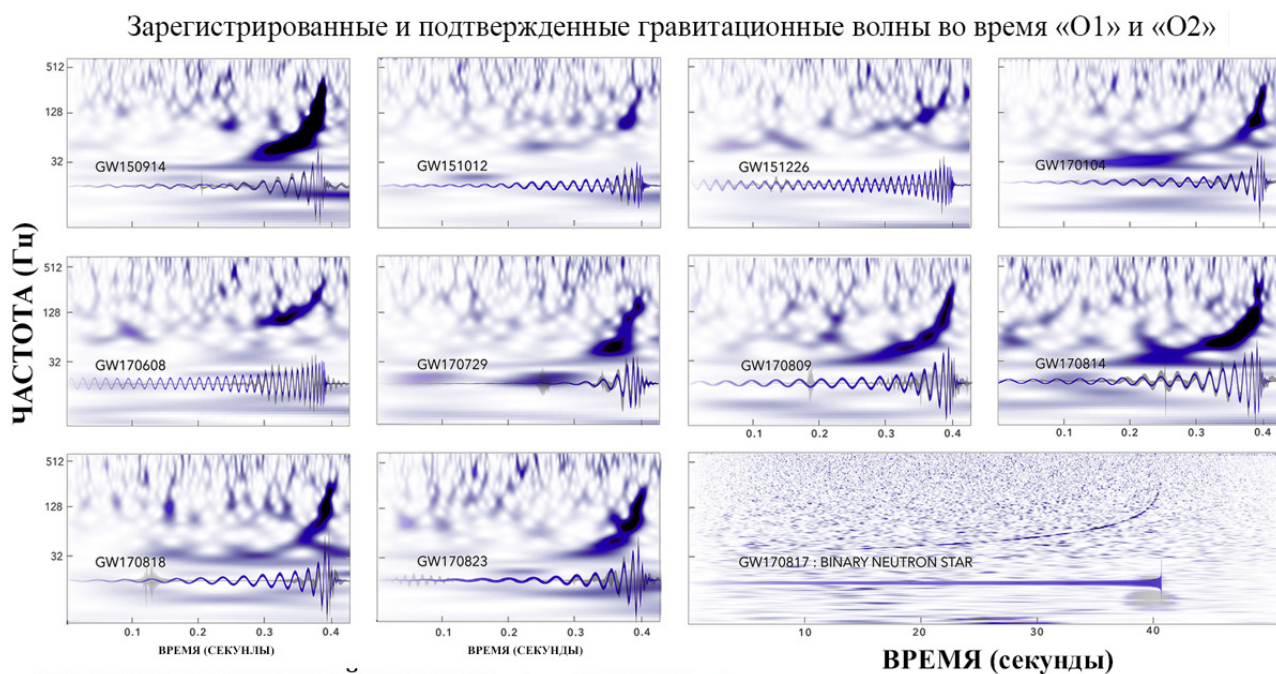


Рис. 6. Последний изданный LIGO-коллаборацией каталог зарегистрированных гравитационных волн за время запусков наблюдений O₁ и O₂
 Fig. 6. Last published GW-events catalog of O₁ and O₂ runs

Табл. 2. Классификация детекторов и планируемые даты запуска
 Table 2. Detectors classification and approximate launch dates

Второе поколение	Третье поколение	Космические обсерватории
[2010] GEO High Frequency	[2030-е годы] Einstein Telescope	[2035] TianQin
[2015] Advanced LIGO	[2030-е годы] Cosmic Explorer	[2030] Taiji
[2016] Advanced Virgo		[2027] DECIGO
[2020] KAGRA (LCGT)		[2034] LISA
[2023] IndIGO (LIGO-Индия)		

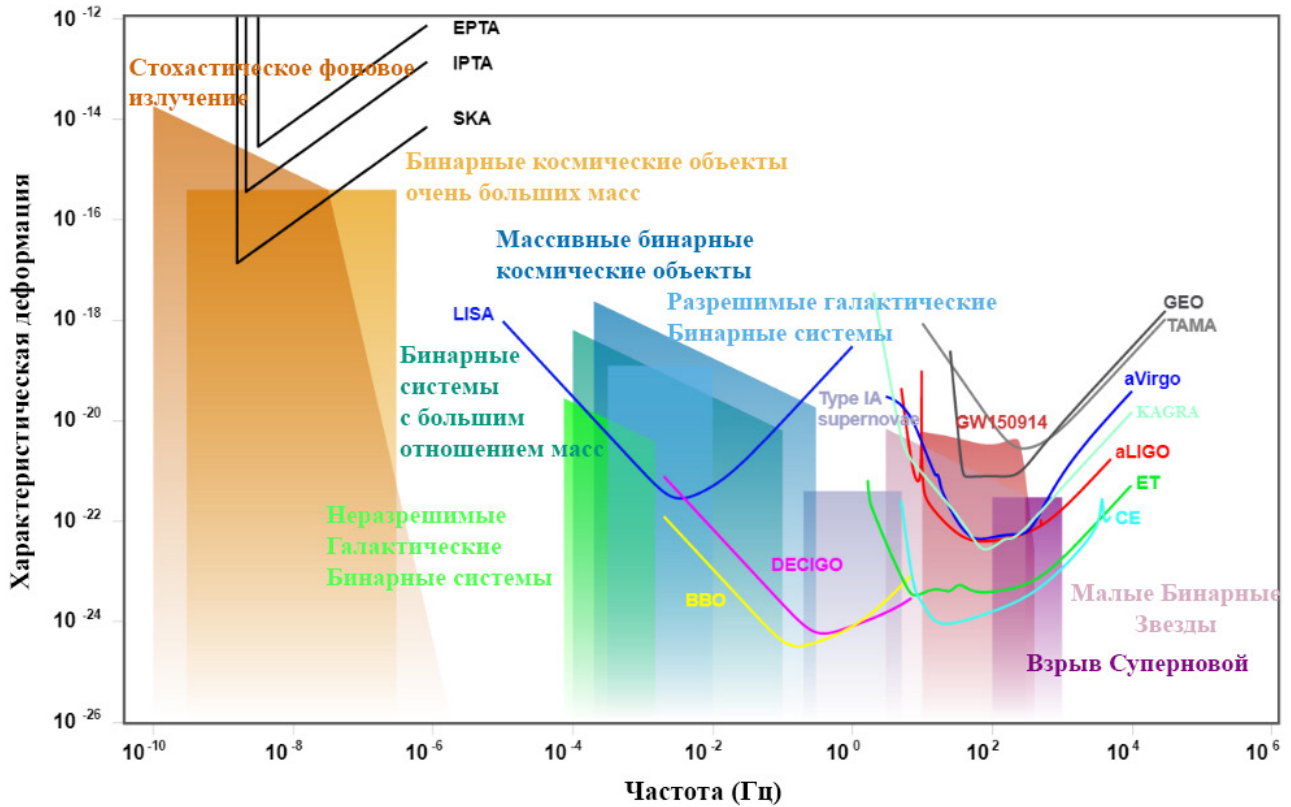


Рис. 7. График чувствительности всех существующих и разрабатываемых ГВ-обсерваторий относительно частоты ГВ-волны, а также всевозможные источники ГВ-волн, их спектр и сила. GW150914 – параметры первой зарегистрированной ГВ. EPTA, IPTA, SKA – проекты, которые используют группы пульсаров для детектирования ГВ
 Fig. 7. Plot of sensitivity curves of GW detectors (future and operating) and possible sources. GW150914 – parameters of the first registered DHW. EPTA, IPTA, SKA – projects that use groups of pulsars to detect GW

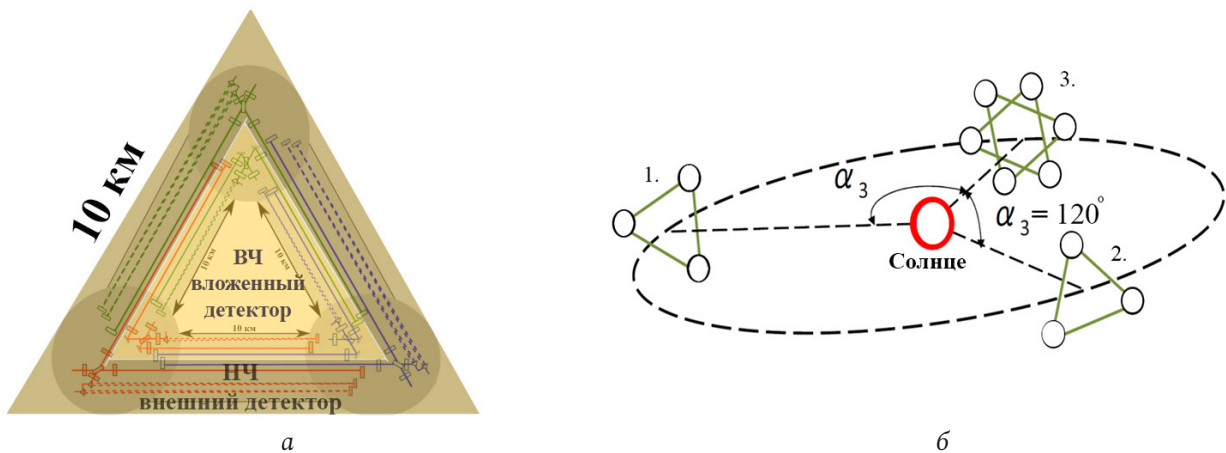


Рис. 8. Конфигурации детекторов ГВ: а – ET и б – DECIGO и BBO. НЧ – низкочастотный; ВЧ – высокочастотный
 Fig. 8. GW Detectors' configuration: a – ET; b – DECIGO and BBO. LF – low frequency; HF – high frequency

Телескоп Эйнштейна (ET), или обсерватория Эйнштейна – это проект наземного детектора гравитационных волн третьего поколения, относящийся к Евросоюзу. В 2021 или 2022 г. будет объявлено местоположение для телескопа Эйнштейна. Телескоп ET разрабатывается для проверки теории сильного поля в ОТО и для расширения спектра детектирования источников ГВ. На данный момент параметры телескопа ET

следующие: подземное расположение, длина плеч детектора 10 км, форма конфигурации – равносторонний треугольник, по два вложенных детектора на каждый угол (рис. 8). Один детектор рассчитан на высокие частоты от 10 Гц до 10 кГц, второй – на низкие частоты от 1 до 250 Гц. Низкочастотные интерферометры будут использовать оптику, охлажденную до 10 К, с мощностью луча около 18 кВт. Высокочастотные будут использовать

оптику комнатной температуры и гораздо более высокую мощность рециркулирующего луча до 3 МВт [37]. Испытательный макет телескопа ET, называемый ET-Pathfinder, будет построен в Маастрихтском университете в Нидерландах.

Лазерная интерферометрическая космическая антенна (LISA) – это проект первого специализированного космического детектора гравитационных волн Европейского космического агентства (ESA). Концепция LISA представляет собой систему из трех космических аппаратов, расположенных в равностороннем треугольнике с плечами длиной 2,5 млн км и находящихся на гелиоцентрической орбите, схожей с орбитой Земли, в точках Лагранжа [38; 39].

Интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория Децигерца (или ДЕЦИГО/DECIGO) – это проект Японии, но базируемый в космическом пространстве в отличие от KAGRA. Детектор назван так из-за того, что спектр его чувствительности лежит в полосе частот от 0,1 до 10 Гц, заполняя зазор между чувствительностями детекторов LIGO и LISA. Планируется запустить в 2027 г. Конструкция схожа с LISA: 3 спутника в треугольном расположении, но с длиной плеч в 1000 км (рис. 8). В конце 2020-х годов планируется запуск B-DECIGO – прототипа проекта с длиной плеч в 100 км. Размещение – околоземная орбита со средней высотой 2000 км [40; 43].

«Наблюдатель большого взрыва» (BBO) – проект-преемник LISA от Европейского космического агентства (ESA). Основная научная цель – наблюдение реликтовых гравитационных волн, излучившихся через малое время в результате Большого взрыва. Помимо этого, предполагается, что спектр детектируемых источников BBO перекроет спектры LIGO, LISA. Его предельная чувствительность будет определяться мощностью лазеров и корреляцией сигналов с другими интерферометрами, которые будут размещены вокруг Солнца. Первая часть космической обсерватории BBO схожа с LISA и состоит из трех космических аппаратов, размещенных в вершинах равностороннего треугольника. Вторая часть – добавляется еще три таких же треугольника (всего двенадцать космических аппаратов), расположенных каждые 120° друг от друга на солнечной орбите. Следовательно, всего 3 позиции на орбите, причем в одной из позиций две системы из треугольников лежат в одной плоскости и повернуты относительно друг друга так, что образуют правильный шестиугольник (рис. 8). Отдельные спутники будут отличать-

ся более мощными лазерами в сравнении с LISA. Длина плеч составит около 50 тыс. км [41; 43].

«Космический исследователь» – проект наземной гравитационно-волновой обсерватории третьего поколения. В 2019 г. команда Cosmic Explorer опубликовала план исследований на 2020 г., необходимых для создания обсерватории. Космический исследователь имеет форму конфигурации LIGO. Длины плеч составят 40 км [42; 44]. Это значительно повысит чувствительность обсерватории и гипотетически позволит наблюдать слияния первых черных дыр во Вселенной.

В настоящее время предпринимаются усилия по косвенному обнаружению гравитационных волн астрономическими методами. Исследуются группы пульсаров (*EPTA*, *IPTA*, *SKA*), звездных остатков, которые испускают повторяющиеся импульсы излучения, для обнаружения малых временных сдвигов, вызванных прохождением гравитационных волн. Этот подход применяется для обнаружения низкочастотных волн, возникающих при слиянии сверхмассивных черных дыр – одного из самых высокоэнергетических событий в космосе (рис. 7).

После более чем четырех десятилетий от начала проекта LIGO-детекторы достигли порога чувствительности, достаточного, чтобы подтвердить существование ГВ. Обнаруженные гравитационные волны уже оказали большое влияние на фундаментальную физику, астрофизику и ядерную физику. В США появился патент на проект генератора гравитационных волн и оружия, основанных на новом физическом явлении [45].

Исходя из высокой сложности, стоимости и актуальности разработки новых детекторов ГВ, появляется необходимость в наличии программного обеспечения, которое способно проектировать и моделировать новые детекторы гравитационных волн, проводить численные эксперименты. Целью данной работы является разработать программное обеспечение по моделированию детектора гравитационных волн на основе интерферометра с подвижными зеркалами.

2. Моделирование детектора гравитационных волн

В настоящее время в существующих и разрабатываемых детекторах зеркала высокостабилизированы, но подвижны. Неподвижные зеркала в интерферометре Майкельсона дают нулевую амплитуду сигнала на детекторе, что означает от-

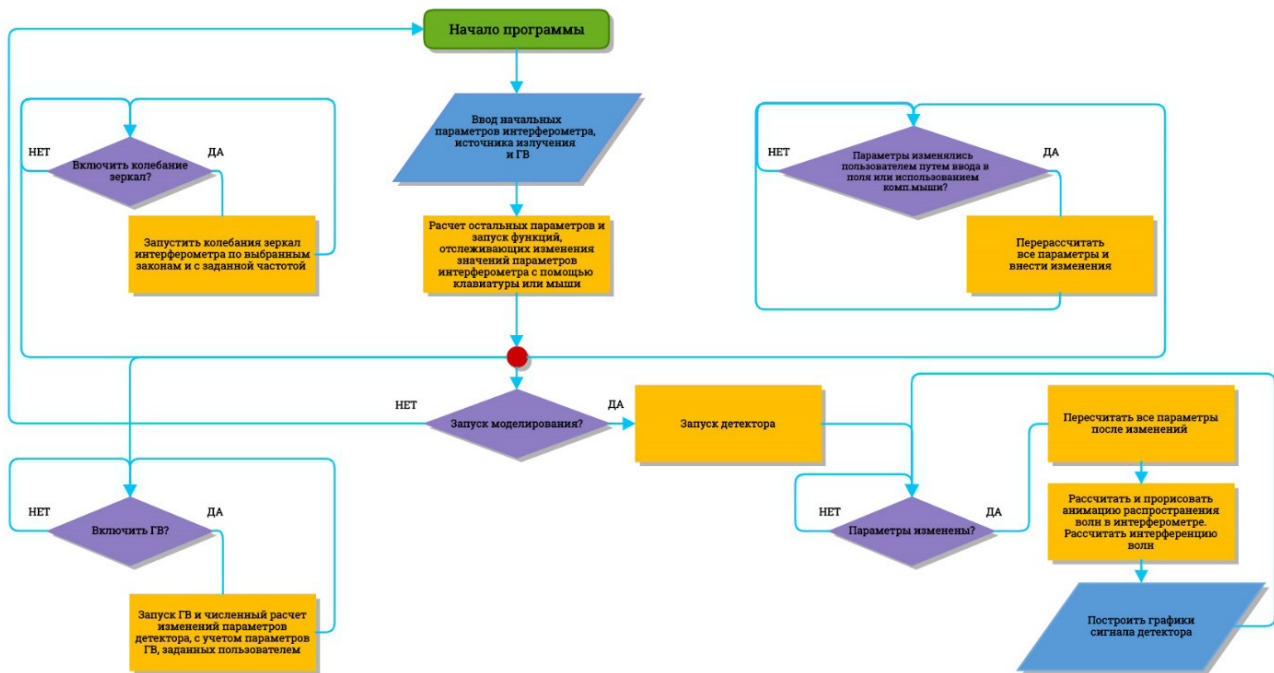


Рис. 9. Алгоритм разрабатываемой программы
Fig. 9. Algorithm of the program developed

сутствие гравитационной волны. В эксперименте зеркала постоянно колеблются из-за сейсмических возмущений. Основной задачей моделирования является исследование влияния характера движений зеркал интерферометра на результирующий сигнал детектора. В программе задается различный функциональный характер движения зеркал, что позволяет аналитически и визуально исследовать работу детектора. Для изучения работы ГВ-детектора и численной оценки его разрешающей способности разработано программное обеспечение LIGO-RM. Оно позволяет управлять конфигурацией интерферометра и моделирует сигнал детектора, а также с его помощью можно проводить численные эксперименты по оценке чувствительности детектора. Алгоритм программы представлен на рис. 9.

По данному алгоритму был написан код на языке C++ в кросс-платформенной среде разработки Embarcadero RAD Studio. Данная программа скомпилирована для ОС Windows, также может быть скомпилирована для ОС Mac, Linux и для мобильных устройств Android, iOS.

Согласно представленной блок-схеме алгоритма, вначале программы пользователь вводит исходные параметры детектора и гравитационной волны. В данном ПО пользователь может задавать и контролировать следующие параметры:

- 1) длину волны излучателя;
- 2) длины плеч интерферометра;

- 3) время, затрачиваемое волной на распространение в плече (в каждом плече отдельно);
- 4) количество полувольт (волн) в каждом плече отдельно;
- 5) фазу волны;
- 6) положение зеркал (в каждом плече отдельно);
- 7) запускать колебания зеркала(зеркал) по заданному закону с заданной частотой;
- 8) выбирать закон, по которому происходят колебания зеркала;
- 9) контролировать положения зеркал с точностью фазы колебания от 0 до 2π ;
- 10) запуск гравитационной волны;
- 11) тип или функцию гравитационной волны;
- 12) параметры выбранной функции ГВ.

Разработанное ПО LIGO-RM имеет графический интерфейс (рис. 10), что значительно повышает уровень удобства использования. Графический интерфейс позволяет пользователю оперативно управлять настройками эксперимента, изменяя параметры детектора за счет ввода новых значений или используя интерактивные функции: перетаскивание зеркал с помощью мыши, поворот графических регуляторов и т. д. Для отображения результатов численного эксперимента и образовательной части приложение поддерживает интерактивный режим с анимацией, отображающий распространение излучения в плечах интерферометра, движение зеркал, а также построение графиков в реальном времени наподобие осцил-

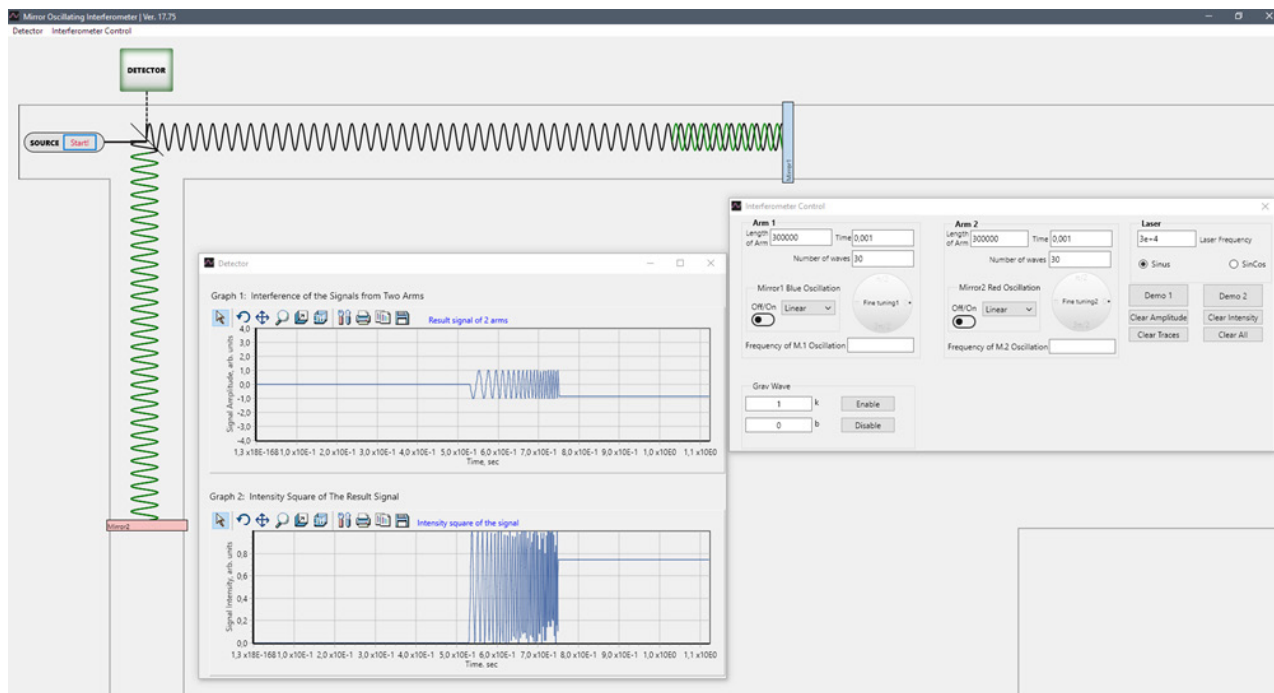


Рис. 10. Снимок окна разрабатываемого приложения
 Fig. 10. Screenshot of the program developed

логафа. Все это дает пользователю возможность наблюдать работу детектора с возможностью непосредственного вмешательства.

После того как пользователь ввел параметры, согласно алгоритму, программа производит расчет анимации и физический расчет интерференции сигналов. Анимация отображает распространение волны в интерферометре до зеркал и обратно, изменение положения зеркал пользователем вручную, колебание зеркал и множество динамических графиков.

В созданной программе пользователь может активировать колебания зеркал по определенному закону, выбирая из предложенного «выпадающего списка». Графики законов колебания зеркал при их активации отображаются в правом нижнем углу программы. Пользователь задает частоту этих колебаний.

Результаты работы интерферометра отражаются в отдельном окне в виде построения следующих графиков в режиме реального времени с шагом, который задается пользователем (по умолчанию 1 мс):

- а) график результирующей амплитуды сигнала на детекторе;
- б) график результирующей интенсивности сигнала;
- с) графики колебания зеркал.

Для расчета фазового сдвига волны источника излучения в детекторе, вызванного деформацией

плеч интерферометра от взаимодействия с ГВ, предлагается следующее выражение:

$$T = t_0 \left(1 + \frac{\int_0^T g(t) dt}{T} \right), \quad (1)$$

где t_0 – время обычное, или неизменное, что волна излучателя затрачивает на прохождение плеча интерферометра при отсутствии возмущающей гравитационной волны; $g(t)$ – функция комплексной амплитуды гравитационной волны; T – фаза волны в момент ее возврата на делитель луча.

Рассмотрим один из примеров, когда формула (1) имеет аналитическое решение. Для этого в качестве функции гравитационной волны запишем линейную функцию $g(t) = kt + b$, аналитическое решение уравнения для фазы примет следующий вид:

$$T = \frac{1+b}{1/t_0 + k}. \quad (2)$$

Полученное уравнение (1) позволяет находить набевашую фазу волны T , после прохождения ею плеча интерферометра в зависимости от вида функции гравитационной волны $g(t)$, что используется для численного решения в разработанной программе.

Созданное ПО было численно протестировано на известных задачах, которые имеют аналитическое решение: 1) при разной длине плеч интерферометра наблюдался постоянный сигнал, 2) при одинаковой длине плеч сигнал был равен нулю.

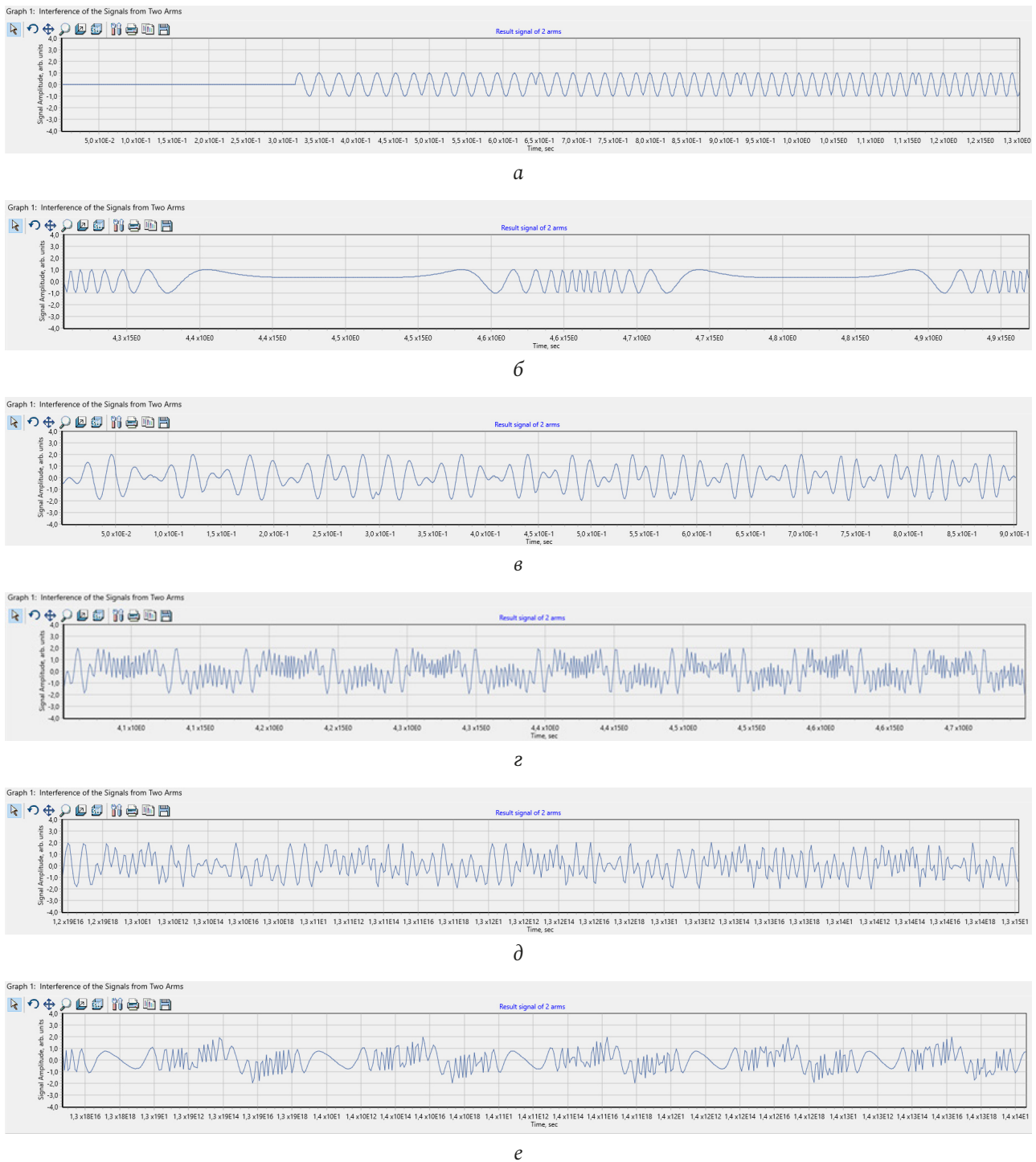


Рис. 11. Графики сигналов на ГВ-детекторе для различных законов колебаний зеркал: *a* – одно зеркало движется по линейному закону – другое неподвижно; *б* – одно по закону, где изменение координаты зеркала пропорционально 4-й степени смещения (x^4) – другое неподвижно; *в* – оба по линейному закону; *г* – оба пропорционально 3-й степени смещения – x^3 ; *д* – оба – $\sin(x)$; *е* – оба – x^5 .

Fig. 11. Graphics of the signals on the GW-detector for different mirror oscillation laws: *a* – one mirror is still and the other is moving linearly; *b* – one is still and other is moving due to the law where the displacement of a coordinate is proportional to its 4th power (x^4); *c* – both are moving linearly; *d* – both are moving due to $\sim x^3$; *e* – both $\sim \sin(x)$; *f* – both $\sim x^5$.

После тестирования созданного программного обеспечения был проведен ряд численных экспериментов и получены результаты работы детектора при наличии и отсутствии колебаний зеркал. Результаты численных экспериментов представ-

лены на графиках ниже (рис. 11), которые также являются скриншотами ПО LIGO-RM.

Рассмотрим более детально один из полученных результатов, например рис. 11, *е*, также проанализируем его.

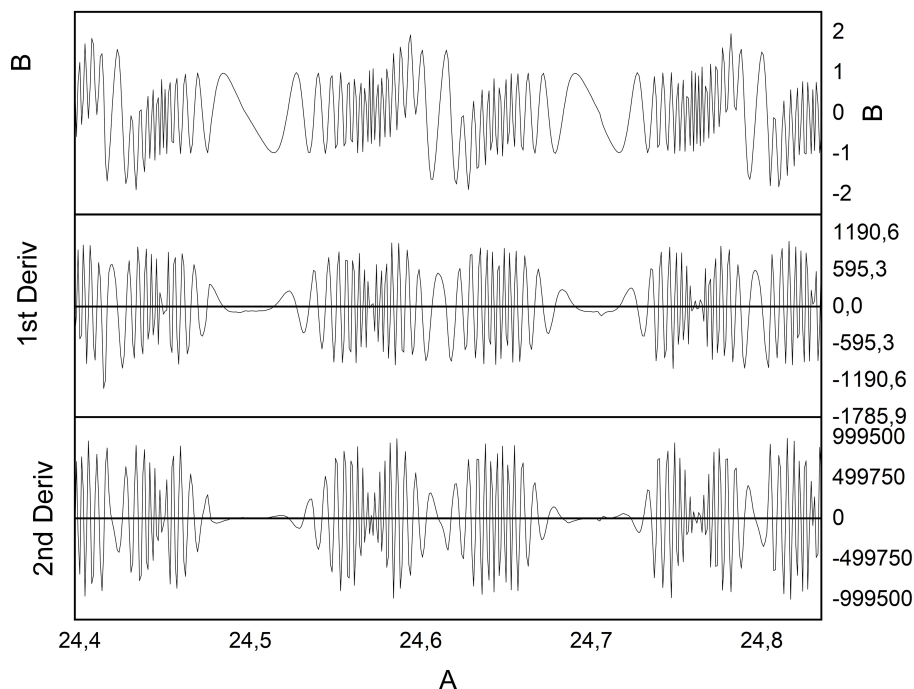


Рис. 12. График сигнала на ГВ-детекторе для конфигураций, где оба зеркала движутся по закону изменения координаты, возведенной в пятую степень $-x^5$, а также его 1-ая и 2-ая производные
 Fig. 12. Detector's signal graph when the mirrors of it oscillates due to Quintic law and its 1st and 2nd derivatives

На рис. 12 представлен график сигнала на детекторе интерферометра Майкельсона с осциллирующими зеркалами (первая ось сверху), а также 1-я и 2-я производные под ним. Общая длительность сигнала составила 1,136 с. Общий вид сигнала напоминает вид незатухающих гармонических колебаний. На графике видны участки схожести, которые повторяются друг за другом и образуют весь сигнал. Период таких участков составляет $T = 166$ мс. То есть, длительность одного такого участка равна 166 мс, что составляет примерно 1/7 часть от всего сигнала длительностью 1136 мс. Данные участки имеют интервалы с переменной частотой. Значение амплитуды колеблется от макс. 1,995 до мин. $-1,895$ вокруг среднего значения, равного 0,013. Каждый участок схожести длительностью 166 мс можно разделить на три характерных интервала. Эти 3 интервала можно разделить/классифицировать по частоте сигнала, или изменению крутизны пиков. Первый интервал содержит высокую частоту сигнала, или большую крутизну пиков. Количество пиков составило 12 из 30 (весь участок). Длительность первого интервала составила 60 мс. Второй интервал содержит всего 2 пика с малой крутизной, если сравнивать с 1-м интервалом, т. е. имеет низкую частоту сигнала. Длительность интервала составила 52 мс. Длительность самого широкого пика равняется 32 мс по основанию. Третий интервал содержит оставшиеся 16 пиков с высокой частотой (приблизительно

равной, как в 1-й части). Длительность составила 54 мс. В 1-м и 3-ем интервале участка частота следования пиков изменяется примерно в 2 раза.

Далее был проведен численный эксперимент при наличии ГВ линейного типа и покоящихся зеркалах. Результат численного эксперимента представлен на рис. 13.

Из рис. 13 видно, что во время отсутствия гравитационной волны сигнал на детекторе постоянный и равен нулю. В момент прохождения гравитационной волны сквозь детектор плечо интерферометра испытывает деформацию и на детекторе возникает сигнал. Сигнал по форме напоминает гладкую синусоиду, частота которой меняется в сторону увеличения. С увеличением частоты сигнал на детекторе становится более грубым и резким. Полученный результат соответствует теории.

Следующим численным экспериментом является запуск гравитационной волны при одном неподвижном зеркале и колебании другого зеркала по закону, в котором каждая точка положения зеркала рассчитывается как изменение координаты, возведенное в четвертую степень. Результат эксперимента представлен на рис. 14.

Из графика на рис. 14 явно видно постепенное изменение периодического сигнала: участки квазипостоянного сигнала плавно перестали быть таковыми за счет последовательного уменьшения амплитуды и сменились участками плавного

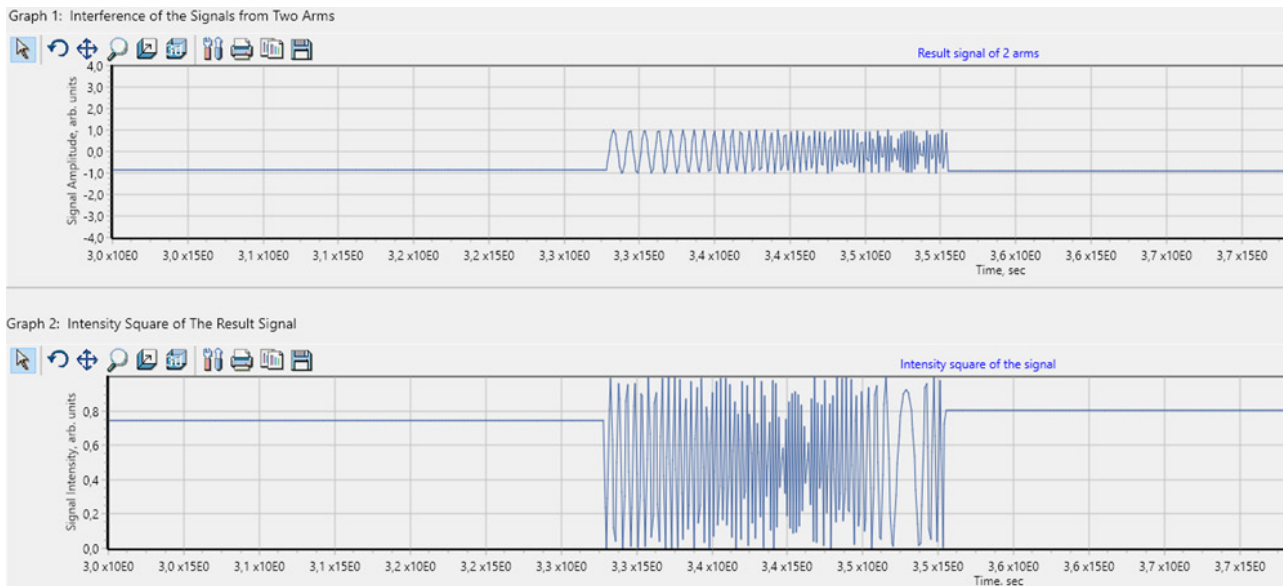


Рис. 13. График сигнала на детекторе при неподвижных зеркалах под воздействием гравитационной волны линейного типа в определенный отрезок времени

Fig. 13. Graphic of the signal on the detector with motionless and isolated mirrors configuration after a linear-type gravitational wave passed through it

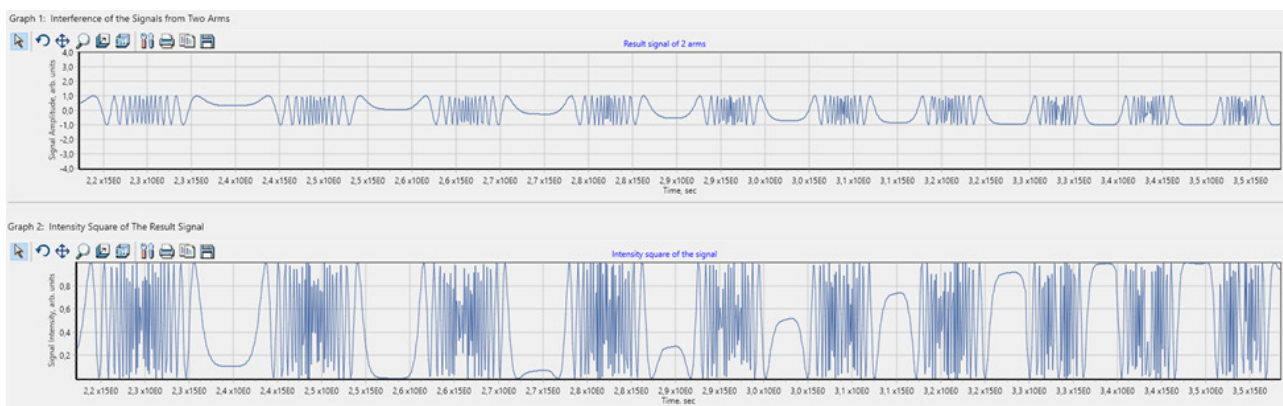


Рис. 14. График сигнала на детекторе, где одно из зеркал колеблется по закону изменения координаты, возведенной в 4-ю степень, под воздействием гравитационной волны линейного типа в определенный отрезок времени

Fig. 14. Graphic of the signal on the detector with one still mirror and one oscillates due to Quartic law after a linear-type gravitational wave passed through it

спада амплитуды. Данные изменения видны при сравнении с исходным сигналом – при отсутствии гравитационной волны, – отображенным на графике на рис. 11, б. Как описывалось ранее, на данном графике помимо участков квазипостоянного сигнала имеются симметричные по изменению частоты участки быстрого и медленного изменения амплитуды. Регистрация гравитационной волны может быть осуществлена по росту амплитуды в участках сигнала медленного изменения амплитуды и по изменению длительности участков сигнала быстрого изменения амплитуды (рис. 14).

Заключение

В ближайшее столетие область гравитационных волн ожидаемо будет одной из самых активно раз-

виваемых и изучаемых сфер физической науки, что подтверждается принятыми и финансируемыми проектами, запланированными на десятки лет вперед (табл. 3). С каждым днем растет количество прямых регистраций гравитационных волн за счет современных сверхточных установок. На сегодняшний день зарегистрировано 67 волн с учетом того факта, что 80 % регистраций было произведено лишь за последний год (рис. 5).

Для успешной регистрации ГВ требуется учитывать многие факторы, влияющие на работу детектора. Так как ГВ имеет очень малую амплитуду и обладает поляризацией, то немалую роль играют пространственная ориентация детектора и их количество. Другими словами, большое число детекторов позволяет с большей достоверностью

говорить о том, что зарегистрированное событие является ГВ. В связке LIGO-обсерватории детекторы, разнесенные на 3 тыс. км, используются для корреляционного анализа между совместными событиями и для пространственного определения направления источника ГВ. Соответственно, если используются лишь два детектора, велика вероятность того, что ГВ не будет задетектирована либо событие не будет являться ГВ. Учитывая тот факт, что ГВ-детектор является очень чувствительной установкой, главной задачей является отличить событие ГВ от любого другого события на детекторе. Необходимо учитывать вероятности истинного и ложного срабатывания детектора для четырех возможных случаев: 1) гравитационная волна есть, и детектор ее обнаружил; 2) гравитационная волна есть, но детектор ее не обнаружил; 3) гравитационной волны нет, но детектор ее обнаружил; 4) гравитационной волны нет, и детектор ничего не обнаружил. Чтобы убедиться в достоверности срабатывания ГВ-детектора, требуется подтверждение альтернативных измерительных ком-

плексов. Событие ГВ должно сопровождаться и подтверждаться энергетическими всплесками в электромагнитном спектре (такими как видимый диапазон, гамма-излучение и т. д.).

Как указано выше, необходимо программное обеспечение, способное моделировать гравитационно-волновые детекторы различной конфигурации и исследовать их параметры и возможности. Разработанное программное обеспечение LIGO-RM дает возможность оценить чувствительность ГВ-детектора с осциллирующими, а не статическими зеркалами. LIGO-RM моделирует наличие гравитационной волны заданного типа и позволяет наблюдать ее влияние на результат работы интерферометра Майкельсона в интерактивном виде и в виде численного результата. Программа содержит базу гравитационных волн различного вида формы волны и постоянно пополняется. Результат одного из таких моделирований программы в случае гравитационной волны линейного вида отображен на рис. 13.

Список литературы

1. Maxwell J.C. A dynamical theory of the electromagnetic field // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1865. Vol. 155. P. 459–512. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstl.1865.0008>
2. Heaviside O. A gravitational and electromagnetic analogy. Part I // *The Electrician*. 1893. Vol. 31. P. 281–282.
3. Heaviside O. A gravitational and electromagnetic analogy. Part II // *The Electrician*. 1893. Vol. 31. P. 359.
4. Poincaré M.H. Sur la dynamique de l'électron // *Rend. Circ. Mat. Palermo*. 1906. Vol. 21, no. 1. P. 129–175. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03013466>
5. Einstein A. Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes // *Annalen der Physik*. 1911. Vol. 340, no. 10. P. 898–908. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.19113401005>
6. Abraham M. Zur Theorie der Gravitation // *Physikalische Zeitschrift*. 1912. Vol. 13. P. 1–4.
7. Mie G. Grundlagen einer Theorie der Materie // *Annalen der Physik*. 1912. Vol. 342, no. 3. P. 511–534. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.19123420306>
8. Mie G. Grundlagen einer Theorie der Materie // *Annalen der Physik*. 1913. Vol. 345, no. 1. P. 1–66. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.19133450102>
9. Nordström G. Zur Theorie der Gravitation vom Standpunkt des Relativitätsprinzips // *Annalen der Physik*. 1913. Vol. 347, no. 13. P. 533–554. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.19133471303>
10. Einstein A. Gravitationswellen // *Preussische Akademie der Wissenschaften Sitzungsberichte*. Part 1. 1918. P. 154–167.
11. Trautman A. Sur la propagation des discontinuités du tenseur de Riemann // *CR Acad. Sci. Paris*. 1958. Vol. 246. P. 1500–1502.
12. Trautman A. Boundary conditions at infinity for physical theories // *Bull. Acad. Polon. Sci., sér. sci. math., astr. et phys.* 1958. Vol. 6. P. 403–406.
13. Trautman A. Radiation and boundary conditions in the theory of gravitation // *Bull. Acad. Polon. Sci., sér. Sci. math., astr. et phys.* 1958. Vol. 6. P. 407–412.
14. Trautman A. On gravitational radiation damping // *Bull. Acad. Polon. Sci., sér. Sci. math., astr. et phys.* 1958. Vol. 6. P. 627–633.
15. Trautman A. Lectures on General Relativity // *Lectures at King's College London*. 1958.
16. Robinson I., Trautman A. Spherical gravitational waves // *Phys. Rev. Lett.* 1960. Vol. 4. P. 431–432. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.4.431>
17. Bondi H. Plane gravitational waves in general relativity // *Nature*. 1957. Vol. 179. P. 1072–1073. DOI: <https://doi.org/10.1038/1791072a0>
18. Gravitational waves in general relativity III: Exact plane waves/ H. Bondi [et al.] // *Proc. R. Soc. London. Ser. A*. 1959. Vol. 251, no. 1267. P. 519–533. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1959.0124>
19. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger / B.P. Abbot [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* 2016. Vol. 116, no. 6. P. 061102–1–16. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>

20. Weber J. Gravitational-wave-detector events // *Physical Review Letters*. 1968. Vol. 20, no. 23. P. 1307–1308. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.20.1307>
21. Gertsenshtein M.E., Pustovoit V.I. On the detection of low frequency gravitational waves // *Sov. Phys. JETP*. 1962. Vol. 43, no. 2. P. 605–607.
22. Exploring the sensitivity of next generation gravitational wave detectors / B.P. Abbott [et al.] // *Class. Quantum Grav.* 2017. Vol. 34, no. 4. P. 044001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6382/aa51f4>
23. Weber J. Evidence for discovery of gravitational radiation // *Phys. Rev. Lett.* 1969. Vol. 22, no. 24. P.1320-1324. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.22.1320>
24. Kafka P. Are Weber's Pulses Illegal? Essay Submitted to Gravity Research Foundation. 1972. 9 p. URL: <https://www.gravityresearchfoundation.org/s/kafka.pdf>
25. Allen W.D., Christodoulides C. Gravitational radiation experiments at the University of Reading and the Rutherford Laboratory // *J. Phys. A Math. Gen.* 1975. Vol. 8. P. 1726–1733. DOI: <https://doi.org/10.1088/0305-4470/8/11/007>
26. Weiss R. Electromagnetically coupled broadband gravitational antenna // *Quarterly Report of the Research Laboratory for Electronics*. 1972. No. 105. P. 54–76.
27. LIGO // Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory. URL: <https://www.ligo.caltech.edu> (дата обращения: 29.05.2020).
28. KITP // Kavli Institute for Theoretical Physics. URL: <https://www.kitp.ucsb.edu> (дата обращения: 01.05.2020).
29. Advanced LIGO // LIGO Scientific Collaboration / LIGO Livingston: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1411/1411.4547.pdf> (дата обращения: 01.01.2020).
30. Cervantes-Cota J.L., Galindo-Uribarri S., Smoot G.F. A brief history of gravitational waves // *Universe*. 2016. Vol. 2, no. 3. P. 22–52. DOI: <https://doi.org/10.3390/universe2030022>
31. LIGO NEWS // LIGO Suspends Third Observing Run (O3). URL: <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20200326> (дата обращения: 01.04.2020).
32. GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral / B.P. Abbott [et al.] // *Physical Review Letters*. 2017. Vol. 119, no. 16. P. 161101-1–18. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.161101>
33. Multi-messenger observations of a binary neutron star merger / B.P. Abbott [et al.] // *The Astrophysical Journal Letters*. 2017. Vol. 848, no. 2. P. L12. DOI: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa91c9>
34. The Nobel Prize // The Nobel Prize in Physics 2017. URL: <https://www.nobelprize.org> (дата обращения: 12.12.2019).
35. KAGRA Observatory News // KAGRA Gravitational-wave Telescope Starts Observation. URL: <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/archives/1381> (дата обращения: 25.02.2020).
36. Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA / B.P. Abbott [et al.] // *Living Rev. Relativ.* 2018. Vol. 21, no. 1. P. 3-1–57. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41114-018-0012-9>
37. Sensitivity studies for third-generation gravitational wave observatories / S. Hild [et al.] // *Class. Quantum Grav.* 2011. Vol. 28, no. 9. P. 094013. DOI: <https://doi.org/10.1088/0264-9381/28/9/094013>
38. Laser Interferometer Space Antenna: A proposal in response to the ESA call for L3 mission concepts / K. Danzmann [et al.] // *arXiv:1702.00786*. 2017. P 1–41.
39. NGO. Revealing a Hidden Universe: Opening a New Chapter of Discovery: Assessment Study Report / O. Jenrich [et al.]. Paris: ESA, 2011. 153 p.
40. The Japanese space gravitational wave antenna – DECIGO / S. Kawamura [et al.] // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2008. Vol. 122. P. 012006-1–8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/122/1/012006>
41. Laser interferometry for the Big Bang Observer / G.M. Harry [et al.] // *Class. Quantum Grav.* 2006. Vol. 23, no. 15. P. 4887–4894. DOI: <https://doi.org/10.1088/0264-9381/23/15/008>
42. Cosmic explorer: The U.S. contribution to gravitational-wave astronomy beyond LIGO / D. Reitze [et al.] // *Bulletin of the American Astronomical Society*. 2019. Vol. 51, no. 7. P 1–12. URL: <https://baas.aas.org/pub/2020n7i035>
43. Yagi K., Seto N. Detector configuration of DECIGO/BBO and identification of cosmological neutron-star binaries // *Phys. Rev. D*. 2011. Vol. 83, no. 4. P. 044011-1–14. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.044011>
44. Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory. Instrument Science White Paper LIGO-T1600119-v4. 2016. 116 p. URL: <https://dcc.ligo.org/public/0125/T1600119/004/wp2016.pdf>
45. Patent US 10,322,827 B2. High frequency gravitational wave generator / C. Salvatore. Publ. date 18.06.2019. 9 p. URL: [https://pdfpiw.uspto.gov/piw?docid=10322827&SectionNum=1&IDKey=59C80614D29C&HomeUrl=http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO2%2526Sect2=HITOFF%2526u=%252522Fmetahtml%252522FPTO%252522Fsearch-adv.htm%2526r=2%2526f=G%2526l=50%2526d=PTXT%2526p=1%2526S1=\(2019\\$.PD.%2526BAND%252B%252522LIGO%252522\)%2526OS=ISD/2019%2526BAND%252B%252522LIGO%252522%2526RS=\(ISD/2019%2526BAND%252B%252522LIGO%252522\)](https://pdfpiw.uspto.gov/piw?docid=10322827&SectionNum=1&IDKey=59C80614D29C&HomeUrl=http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO2%2526Sect2=HITOFF%2526u=%252522Fmetahtml%252522FPTO%252522Fsearch-adv.htm%2526r=2%2526f=G%2526l=50%2526d=PTXT%2526p=1%2526S1=(2019$.PD.%2526BAND%252B%252522LIGO%252522)%2526OS=ISD/2019%2526BAND%252B%252522LIGO%252522%2526RS=(ISD/2019%2526BAND%252B%252522LIGO%252522)) (дата обращения: 01.02.2020).

References

1. Maxwell J.C. A dynamical theory of the electromagnetic field. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1865, vol. 155, pp. 459–512. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstl.1865.0008>
2. Heaviside O. A gravitational and electromagnetic analogy. Part I. *The Electrician*, 1893, vol. 31, pp. 281–282.
3. Heaviside O. A gravitational and electromagnetic analogy. Part II. *The Electrician*, 1893, vol. 31, p. 359.

4. Poincaré M.H. Sur la dynamique de l'électron. *Rend. Circ. Mat. Palermo*, 1906, vol. 21, no. 1, pp. 129–175. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03013466>
5. Einstein A. Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes. *Annalen der Physik*, 1911, vol. 340, no. 10, pp. 898–908. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.19113401005>
6. Abraham M. Zur Theorie der Gravitation. *Physikalische Zeitschrift*, 1912, vol. 13, pp. 1–4.
7. Mie G. Grundlagen einer Theorie der Materie. *Annalen der Physik*, 1912, vol. 342, no. 3, pp. 511–534. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.19123420306>
8. Mie G. Grundlagen einer Theorie der Materie. *Annalen der Physik*, 1913, vol. 345, no. 1, pp. 1–66. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.19133450102>
9. Nordström G. Zur Theorie der Gravitation vom Standpunkt des Relativitätsprinzips. *Annalen der Physik*, 1913, vol. 347, no. 13, pp. 533–554. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.19133471303>
10. Einstein A. Gravitationswellen. *Preussische Akademie der Wissenschaften Sitzungsberichte. Part 1*, 1918, pp. 154–167.
11. Trautman A. Sur la propagation des discontinuités du tenseur de Riemann. *CR Acad. Sci. Paris*, 1958, vol. 246, pp. 1500–1502.
12. Trautman A. Boundary conditions at infinity for physical theories. *Bull. Acad. Polon. Sci., sér. sci. math., astr. et phys.*, 1958, vol. 6, pp. 403–406.
13. Trautman A. Radiation and boundary conditions in the theory of gravitation. *Bull. Acad. Polon. Sci., sér. Sci. math., astr. et phys.*, 1958, vol. 6, pp. 407–412.
14. Trautman A. On gravitational radiation damping. *Bull. Acad. Polon. Sci., sér. Sci. math., astr. et phys.*, 1958, vol. 6, pp. 627–633.
15. Trautman A. Lectures on General Relativity. Lectures at King's College London, 1958.
16. Robinson I., Trautman A. Spherical gravitational waves. *Phys. Rev. Lett.*, 1960, vol. 4, pp. 431–432. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.4.431>
17. Bondi H. Plane gravitational waves in general relativity. *Nature*, 1957, vol. 179, pp. 1072–1073. DOI: <https://doi.org/10.1038/1791072a0>
18. Bondi H. et al. Gravitational waves in general relativity III: Exact plane waves. *Proc. R. Soc. London. Ser. A*, 1959, vol. 251, no. 1267, pp. 519–533. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1959.0124>
19. Abbot B.P. et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, vol. 116, no. 6, pp. 061102–1–16. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>
20. Weber J. Gravitational-wave-detector events. *Physical Review Letters*, 1968, vol. 20, no. 23, pp. 1307–1308. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.20.1307>
21. Gertsenshtein M.E., Pustovoit V.I. On the detection of low frequency gravitational waves. *Sov. Phys. JETP*, 1962, vol. 43, no. 2, pp. 605–607.
22. Abbott B.P. et al. Exploring the sensitivity of next generation gravitational wave detectors. *Class. Quantum Grav.*, 2017, vol. 34, no. 4, pp. 044001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6382/aa51f4>
23. Weber J. Evidence for discovery of gravitational radiation. *Phys. Rev. Lett.*, 1969, vol. 22, no. 24, pp. 1320–1324. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.22.1320>
24. Kafka P. Are Weber's Pulses Illegal? Essay Submitted to Gravity Research Foundation. 1972. 9 p. URL: <https://www.gravityresearchfoundation.org/s/kafka.pdf>
25. Allen W.D., Christodoulides C. Gravitational radiation experiments at the University of Reading and the Rutherford Laboratory. *J. Phys. A Math. Gen.*, 1975, vol. 8, pp. 1726–1733. DOI: <https://doi.org/10.1088/0305-4470/8/11/007>
26. Weiss R. Electromagnetically coupled broadband gravitational antenna. *Quarterly Report of the Research Laboratory for Electronics*, 1972, no. 105, pp. 54–76.
27. LIGO. Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory. URL: <https://www.ligo.caltech.edu> (accessed: 29.05.2020).
28. KITP. Kavli Institute for Theoretical Physics. URL: <https://www.kitp.ucsb.edu> (accessed: 01.05.2020).
29. Advanced LIGO. LIGO Scientific Collaboration / LIGO Livingston: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1411/1411.4547.pdf> (accessed: 01.01.2020).
30. Cervantes-Cota J.L., Galindo-Uribarri S., Smoot G.F. A brief history of gravitational waves. *Universe*, 2016, vol. 2, no. 3, pp. 22–52. DOI: <https://doi.org/10.3390/universe2030022>
31. LIGO NEWS. LIGO Suspends Third Observing Run (O3). URL: <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20200326> (accessed: 01.04.2020).
32. Abbott B.P. et al. GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Physical Review Letters*, 2017, vol. 119, no. 16, pp. 161101–1–18. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.161101>
33. Abbott B.P. et al. Multi-messenger observations of a binary neutron star merger. *The Astrophysical Journal Letters*, 2017, vol. 848, no. 2, p. L12 DOI: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa91c9>
34. The Nobel Prize. The Nobel Prize in Physics 2017. URL: <https://www.nobelprize.org> (accessed: 12.12.2019).
35. KAGRA Observatory News. KAGRA Gravitational-wave Telescope Starts Observation. URL: <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/archives/1381> (accessed: 25.02.2020).
36. Abbott B.P. et al. Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA. *Living Rev. Relativ.*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 3–1–57. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41114-018-0012-9>

37. Hild S. et al. Sensitivity studies for third-generation gravitational wave observatories. *Class. Quantum Grav.*, 2011, vol. 28, no. 9, p. 094013. DOI: <https://doi.org/10.1088/0264-9381/28/9/094013>
38. Danzmann K. et al. Laser Interferometer Space Antenna: A proposal in response to the ESA call for L3 mission concepts. *arXiv:1702.00786*, 2017, pp. 1–41.
39. Jenrich O. et al. NGO. *Revealing a Hidden Universe: Opening a New Chapter of Discovery: Assessment Study Report*. Paris: ESA, 2011, 153 p.
40. Kawamura S. et al. The Japanese space gravitational wave antenna – DECIGO. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2008, vol. 122, pp. 012006–1–8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/122/1/012006>
41. Harry G.M. et al. Laser interferometry for the Big Bang Observer. *Class. Quantum Grav.*, 2006, vol. 23, no. 15, pp. 4887–4894. DOI: <https://doi.org/10.1088/0264-9381/23/15/008>
42. Reitze D. et al. Cosmic explorer: The U.S. contribution to gravitational-wave astronomy beyond LIGO. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2019, vol. 51, no. 7, pp. 1–12. URL: <https://baas.aas.org/pub/2020n7i035>
43. Yagi K., Seto N. Detector configuration of DECIGO/BBO and identification of cosmological neutron-star binaries. *Phys. Rev. D*, 2011, vol. 83, no. 4, pp. 044011–1–14. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.044011>
44. Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory. Instrument Science White Paper LIGO-T1600119–v4, 2016, 116 p. URL: <https://dcc.ligo.org/public/0125/T1600119/004/wp2016.pdf>
45. Patent US 10,322,827 B2. High frequency gravitational wave generator / C. Salvatore. Publ. date 18.06.2019, 9 p. URL: [## Physics of Wave Processes and Radio Systems 2021, vol. 24, no. 3, pp. 28–45](https://pdfpiw.uspto.gov/piw?docid=10322827&SectionNum=1&IDKey=59C80614D29C&HomeUrl=http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO2%2526Sect2=HITOFF%2526u=%25252Fmetahtml%25252FPTO%25252Fsearch-adv.htm%2526r=2%2526f=G%2526l=50%2526d=PTXT%2526p=1%2526S1=(2019$.PD.%2526BAND%252B%252522LIGO%252522)%2526OS=ISD/2019%2526BAND%252B%252522LIGO%252522%2526RS=(ISD/2019%2526BAND%252B%252522LIGO%252522) (accessed: 01.02.2020).

</div>
<div data-bbox=)

DOI 10.18469/1810-3189.2021.24.3.28-45

Received 1 March 2021
Accepted 5 April 2021

Advanced research directions in gravitational wave detectors

Ivan P. Ohrymenko, Nikolai N. Kolchevsky, Pavel P. Petrov

Belarusian State University
4, Nezavisimosti Avenue,
Minsk, 220030, Belarus

Abstract – The general principles of gravitational waves detection are considered in this paper. Current gravitational wave detectors represent modernized Michelson interferometer – LIGO-detector. Reduction of vibrations in the system and high stabilization of the reflective mirrors is one of the technical problem of the LIGO. It is proposed to study the features of the LIGO-detector with movable mirrors. The software simulating the operation of the LIGO and providing an opportunity to study its characteristics and capacity is developed and named «LIGO-RM». The primary goal of the modelling is to study the signal of the gravitational waves detector with oscillating mirrors. The «LIGO-RM» contains graphic user interface (GUI) that provides interactive control of mirrors movement nature and monitoring of detector signal change. The software simulates the presence of gravitational wave of a requested type and makes it able to monitor its effect on the operation results of the LIGO interferometer in interactive mode or as a numerical outcome. A range of numerical experiments is conducted and the signals on the detector with and without mirrors oscillations are shown. The results of calculations and a possibility of the registration of the gravitational waves using the LIGO-detector with movable mirrors are discussed.

Keywords – gravitational waves; LIGO; movable mirrors; interferometer; gravitational wave detector.

Информация об авторах

Охрименко Иван Петрович, аспирант кафедры физической электроники и нанотехнологий факультета радиофизики и компьютерных технологий, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь. Научный руководитель – доцент Н.Н. Кольчевский.

Область научных интересов: спутники, спутниковые системы, оптика, фотоника, цифровая обработка сигналов, гравитационные волны и гравитационно-волновая астрономия.

E-mail: ivan.ohrymenko@gmail.com

Кольчевский Николай Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физической электроники и нанотехнологий факультета радиофизики и компьютер-

Information about the Authors

Ivan P. Ohrymenko, PhD student of the Department of Physical Electronics and Nanotechnologies, faculty of Radiophysics and Computer Technologies, Belarusian State University, Minsk, Belarus.

Research interests: satellites, satellite systems, optics, photonics, digital signal processing, gravitational waves and gravitational wave astronomy.

E-mail: ivan.ohrymenko@gmail.com

Nikolai N. Kolchevsky, PhD; assistant professor at the Department of Physical Electronics and Nanotechnologies, Faculty of Radiophysics and Computer Technologies, Belarusian State University, Minsk, Belarus.

ных технологий, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь.

Область научных интересов: рентгеновская оптика и рентгеновские методы исследования материалов, методы анализа микро и нано структур и свойств твердого тела, цифровые методы регистрации и обработки результатов измерения, компьютеризированные средства обучения, гравитационно-волновая астрономия.

E-mail: kolchevsky@gmail.com

Петров Павел Васильевич, старший преподаватель кафедры физической электроники и нанотехнологий факультета радиофизики и компьютерных технологий, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь.

Область научных интересов: рентгеновская техника, рентгеновская оптика, рентгеновская микроскопия, гравитационно-волновая астрономия.

E-mail: piatrou@yandex.ru

Research interests: X-ray optics and X-ray methods of materials research, methods of analysis of micro and nano structures and properties of solids, digital methods of recording and processing measurement results, computerized teaching aids, gravitational-wave astronomy.

E-mail: piatrou@yandex.ru

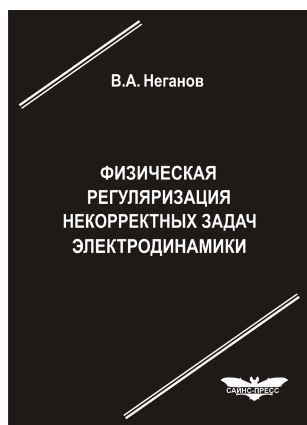
Pavel P. Petrov, senior lecturer at the Department of Physical Electronics and Nanotechnologies, Faculty of Radiophysics and Computer Technologies, Belarusian State University, Minsk, Belarus.

Research interests: X-ray technology, X-ray optics, X-ray microscopy, gravitational-wave astronomy.

E-mail: kolchevsky@gmail.com

Неганов, В.А.

Физическая регуляризация некорректных задач электродинамики: линии передачи, антенны, дифракция электромагнитных волн / В.А. Неганов. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2008. – 432 с., 122 ил.



ISBN 978-5-88070-161-2

УДК 537.87

ББК 32.84

Н 41

Изложены основы физической регуляризации некорректных задач электродинамики, связанной с особенностями физических и математических моделей задач (физические допущения, некорректные математические выкладки, отсутствие предельного перехода). Подход, по мнению автора, обладает большими возможностями, чем метод регуляризации Тихонова А.Н. интегральных уравнений Фредгольма первого рода, названный в книге методом математической регуляризации. Метод физической регуляризации (МФР) применен к анализу волноведущих и излучающих структур, а также задачам дифракции электромагнитных волн на некоторых телах. МФР позволил впервые корректно осуществить анализ полей в ближних зонах некоторых антенн, устранить несамосогласованное приближение Кирхгофа в задачах дифракции, установить связь поверхностной плотности тока проводимости с напряженностями электрического и магнитного полей для диполя Герца и т. п.

Для специалистов в области радиотехники и радиофизики СВЧ, электромагнитной совместимости РТС, математической теории дифракции и математического моделирования электродинамических структур самого широкого назначения. Может быть полезна преподавателям вузов, докторантам, аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.