

УДК 530.122.1

**РАСЧЕТ СИГНАЛА ДЕТЕКТОРА ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН
С УЧЕТОМ КОЛЕБАНИЯ ОТРАЖАЮЩИХ ЗЕРКАЛ****И.П. ОХРИМЕНКО, канд. физ.-мат. наук, доц. Н.Н. КОЛЬЧЕВСКИЙ, П.В. ПЕТРОВ
(Белорусский государственный университет, Минск)**

Исследован детектор гравитационных волн с подвижными зеркалами. В функционирующих на сегодняшний день наземных детекторах (LIGO и др.) отражающие зеркала изолированы от вибраций любого рода, но не являются абсолютно статичными, а наоборот, находятся в системе 4-ступенчатого маятника с большим периодом колебаний. Предложена модель детектора гравитационных волн с зеркалами, осциллирующими по различным функциональным зависимостям. Разработано программное обеспечение LIGO-RM для проведения численного моделирования нового типа детектора. Произведен ряд расчетов сигнала на детекторе гравитационных волн с колеблющимися зеркалами с помощью программы LIGO-RM. Представлены параметры расчета и обсуждены результаты численного моделирования.

Ключевые слова: интерферометры, гравитационные волны, детектор, численное моделирование, LIGO, подвижные зеркала.

Введение. Пуанкаре был первым физиком, который применил термин «гравитационные волны» (Ondes gravifiques) к распространяющимся изменениям гравитационного поля [5]. За «решающий вклад в LIGO-детектор и наблюдение гравитационных волн (ГВ)», была присуждена Нобелевская Премия 2017 года в области физики [1]. На сегодняшний день уже функционируют три гравитационно-волновые обсерватории: LIGO (USA), Virgo (Italy) и KAGRA (Japan) [2]. Обсерватория LIGO сделала ряд фундаментальных физических открытий. Так, было установлено, что скорость распространения ГВ равна скорости света с точностью более, чем $1 \cdot 10^{-15}$ [3]. Гравитационные волны – это изменения гравитационного поля (поля тяготения), распространяющиеся в пространстве с фундаментальной скоростью [1; 4]. 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. ГВ, распространяясь с фундаментальной скоростью света, изменяет свойства кривизны пространства, воздействуя на тела. Амплитуда возмущений, вызванных ГВ от реальных астрономических источников обратно пропорциональна расстоянию до источника и оказывается очень малой величиной ($\sim 10^{-21}$). Наибольшее распространение получили два типа наземных детекторов гравитационных волн:

- 1) массивный цилиндр длиной от 1 до 3 м, регистрирующий низкочастотные механические колебания (Weber bar), – детектор резонансного типа [6];
- 2) лазерный интерферометр, регистрирующий сдвиг интерференционных полос, – детектор электромагнитного принципа [7].

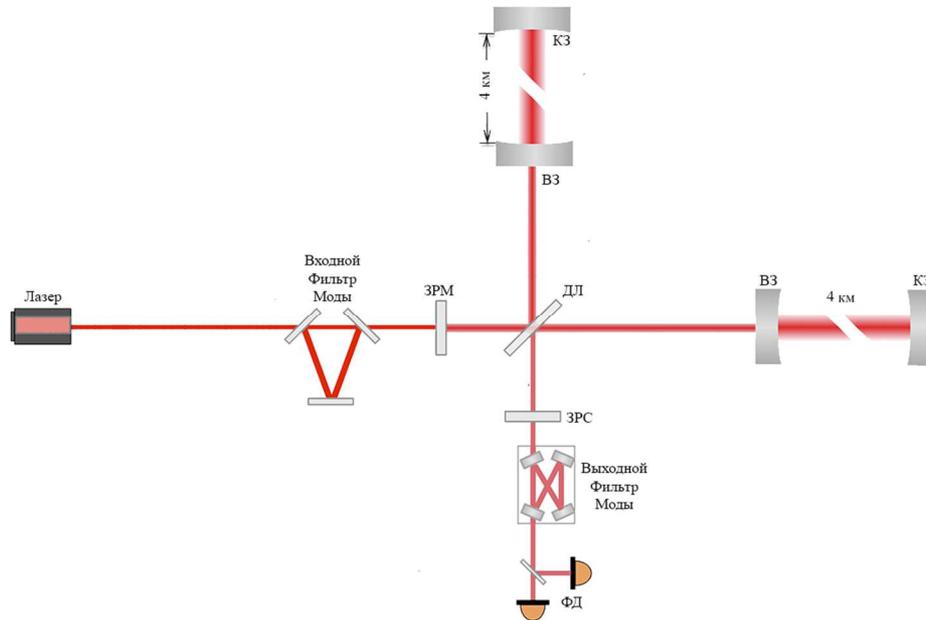
Основной проблемой детекторов первого типа являются тепловые колебания, а детекторов второго типа – сейсмические возмущения [8]. LIGO (Laser-Interferometer Gravitational-wave Observatory) – гравитационно-волновая обсерватория второго типа (рисунок 1) – была построена в 2002 г. и состоит из двух идентичных установок, расположенных в разных концах Соединенных Штатов Америки: одна находится в Ливингстоне, штат Луизиана, а другая – в Хэнфорде, штат Вашингтон. LIGO использует физические свойства света и самого пространства для обнаружения гравитационных волн. LIGO-детектор представляет собой связку из двух больших оптических интерферометров, разнесенных в пространстве на расстояние в 3,002 км. Каждый такой интерферометр является модернизированной версией известного интерферометра Майкельсона. Модернизация осуществлена за счет добавления резонаторов Фабри-Перо в каждое из плеч интерферометра для увеличения оптического хода луча. Основа интерферометра Майкельсона включает в себя источник – лазер; два перпендикулярных плеча, по которым распространяются лучи; фотодиод, на котором два луча снова смешиваются в один.

Идея эксперимента на LIGO-детекторе: когда гравитационная волна проходит через детектор, растяжение и сжатие пространства заставляет плечи интерферометра попеременно удлиняться и укорачиваться в силу поляризации ГВ. По мере того как плечи интерферометров изменяют длины, лазерные лучи, перемещаясь через них, проходят различные расстояния, приводящие к изменению в интерференции между волнами, и происходит сдвиг интерференционных полос. Детальная информация о технических характеристиках LIGO приведена в [9].

По состоянию на декабрь 2019 г. обсерватория LIGO произвела 3 запуска наблюдений, именуемых O^1 , O^2 и O^3 , и зарегистрировала 67 событий, претендующих на явление ГВ [10].

После экспериментального подтверждения существования ГВ во всем мире началась разработка крупных проектов наземных гравитационно-волновых детекторов нового поколения, а также космических

детекторов с повышенной чувствительностью, способных регистрировать новый спектр астрономических источников ГВ [11–18]. Помимо обсерваторий ГВ, США объявила о проекте создания генератора ГВ высокой частоты как оружия, способного уничтожить планетоид размером с Землю [19].



ЗРМ – зеркало рециркуляции мощности; ДЛ – делитель луча; ЗРС – зеркало рециркуляции сигнала; ФД – фотодетектор; ВЗ – входное зеркало; КЗ – концевое зеркало

Рисунок 1. – Упрощенная схема LIGO-детектора

В связи с малой величиной амплитуды ГВ к чувствительности детекторов предъявляются экстремальные требования, превышающие аналогичные требования при наблюдении квантовых эффектов. Из-за наличия шумов различного типа, частотные спектры детекторов ГВ сильно ограничены. Из-за высокой стоимости таких детекторов (для LIGO ~800 млн \$ США) востребовано программное обеспечение (ПО), способное моделировать, оценивать параметры и возможности различных конфигураций детекторов ГВ.

Целью данной работы является разработка ПО, моделирующего работу LIGO-детектора и позволяющего проводить численное моделирование и исследовать сигнал детектора ГВ.

Расчет сигнала на гравитационно-волновом детекторе с колеблющимися зеркалами. Для изучения работы детектора ГВ и численной оценки его разрешающей способности выполнено численное моделирование установки гравитационно-волнового детектора. Разработан алгоритм и программное обеспечение LIGO-RM, которые моделируют работу ГВ-детектора и позволяют управлять его конфигурацией, а также проводить численный эксперимент по оценке чувствительности детектора.

Программа LIGO-RM, или Laser-Interferometer Gravitational-wave Observatory with Ringing Mirrors, исследует модель детектора ГВ с осциллирующими отражающими зеркалами. В переводе с англ. *Ring* означает *звенеть, колебаться* или *осциллировать*. В данной работе исследуется влияние колебаний отражающих зеркал из плавленого кварца на заданной частоте, т.е. зеркала будут звенеть – *Ring*. Алгоритм разработанной программы представлен на рисунке 2.

Данный алгоритм заложен в основу LIGO-RM. LIGO-RM написана на языке C++ в кроссплатформенной среде разработки Embarcadero RAD Studio и функционирует в операционной системе Windows.

В программном обеспечении LIGO-RM для расчета фазового сдвига лазерного луча детектора в результате прохождения сквозь него гравитационной волны и последующей деформации плеч интерферометра используется выражение

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

где t_0 – время обычное, или неизменное, которое волна излучателя затрачивает на прохождение плеча интерферометра при отсутствии возмущающей гравитационной волны;

$g(t)$ – функция комплексной амплитуды гравитационной волны;

T – момент времени, в который фронт волны лазера возвращается на делитель за один импульс.

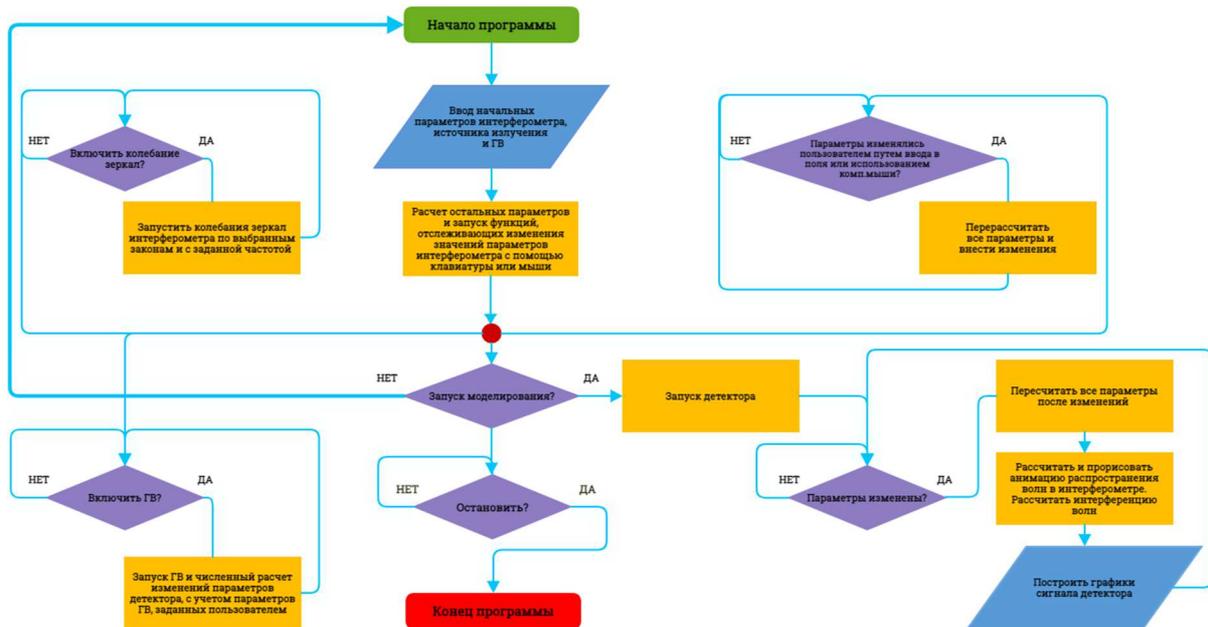


Рисунок 2. – Алгоритм разработанной программы LIGO-RM

Рассмотрим случай, при котором формула (1) имеет аналитическое решение. Для этого в качестве функции гравитационной волны запишем линейную функцию $g(t) = kt + b$, тогда аналитическое решение уравнения для фазы примет вид

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

Уравнение (1) позволяет находить набег фазы волны после прохождения плеча интерферометра лучом лазера в зависимости от вида функции гравитационной волны $g(t)$, что используется для численного решения в разработанной программе.

Согласно представленной на рисунке 2 блок-схеме алгоритма в начале выполнения программы пользователь вводит и в дальнейшем контролирует следующие параметры детектора и гравитационной волны: длину волны излучателя; длину плеч интерферометра (положение зеркал); запуск колебаний зеркал по заданному закону с определенной частотой; запуск гравитационной волны (рисунок 3). Изменяя указанные параметры, пользователь получает новую конфигурацию детектора, а моментальное отображение результатов численного эксперимента, для перерасчета новой конфигурации позволяет оценить ее качественные характеристики и найти оптимальную конфигурацию детектора. Например, положение зеркала фактически определяет длину плеча интерферометра L , что напрямую связано с временем T в формуле (1), которое волна затратит на прохождение данного плеча. Положение зеркала, а соответственно и длина плеча интерферометра, может быть сложной функцией, зависящей от времени, и носить колебательный характер, что и отражено в данной работе. Изменение длины волны излучателя в разработанном ПО носит изобразительно-образовательный характер, показывающий взаимосвязь между длиной волны и длиной плеча интерферометра, но не влияет на результат моделирования сигнала детектора в рамках предложенной модели расчета.

LIGO-RM имеет графический интерфейс (см. рисунок 3), что значительно повышает эффективность проведения численного эксперимента (моделирования). Графический интерфейс позволяет 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 выполняющий построение графиков в реальном времени, имитируя работу осциллографа. Все это дает возможность пользователю наблюдать работу детектора с возможностью непосредственного вмешательства.

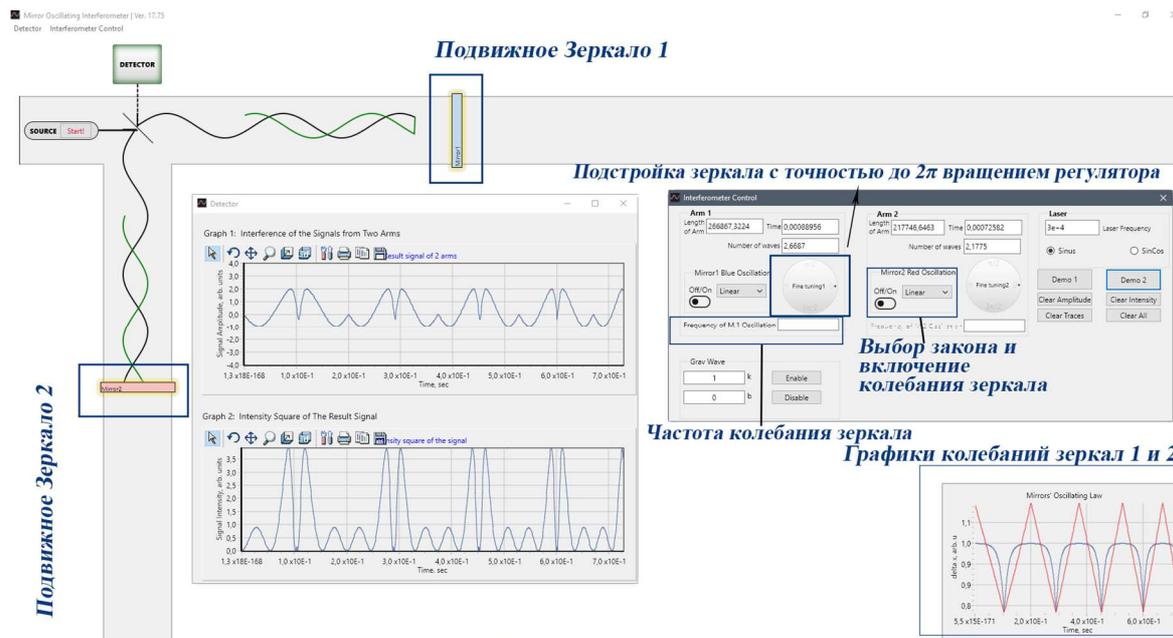


Рисунок 3. – Снимок приложения LIGO-RM и описание его функциональных возможностей

Согласно алгоритму (см. рисунок 2) после ввода параметров программа производит расчет анимации и физический расчет интерференции сигналов. В LIGO-RM реализовано анимационное отображение сопровождения распространения волны в интерферометре до зеркал и обратно, изменения положения зеркал пользователем вручную или их колебания по заданному закону, и формируется ряд динамических графиков. Пользователь может активировать колебания зеркал по определенному закону, выбирая нужный из «выпадающего списка». Графики законов колебания зеркал при их активации отображаются в правом нижнем углу окна программы. Пользователь задает частоту этих колебаний. Сигналы ГВ-детектора отображаются в отдельном окне путем построения графиков в режиме реального времени с шагом, который задается пользователем (по умолчанию – 1 мс). Динамическими графиками являются график результирующей амплитуды сигнала на детекторе; график результирующей интенсивности сигнала; графики колебания зеркал.

Созданное ПО было протестировано на задачах, имеющих аналитическое решение:

- 1) при неравной длине плеч интерферометра наблюдался постоянный ненулевой сигнал,
- 2) при равной длине плеч амплитуда сигнала равнялась нулю.

С помощью разработанного ПО LIGO-RM был проведен ряд численных экспериментов и получены результаты работы детектора при наличии и отсутствии колебаний зеркал. На рисунке 5 представлены результаты численных экспериментов для следующих параметров детектора:

- исходная длина плеч интерферометра – 300 000 м (во всех численных экспериментах);
- частота источника излучения в детекторе – $3 \cdot 10^4$ Гц (для всех графиков);
- длина волны источника излучения в детекторе – $1 \cdot 10^4$ м = 10 км;
- совместные колебания отражающих зеркал в плечах интерферометра происходили только в противофазе (для всех графиков).

Характер функционального движения (колебания) отражающих зеркал для представленных результатов численных экспериментов (рисунок 4), включая численные значения параметров, описывается следующим образом:

(1) – колебания зеркал по линейному закону: изменение координаты x зеркала постоянно и пропорционально коэффициенту n , зависящему от частоты колебания зеркала $x = n(\theta)t$. Частота колебания зеркала в проведенных экспериментах была одинаковой для зеркал и составляла $\theta = 1/3 \text{ с}^{-1}$;

(2) – колебания зеркал по синусоидальному закону $x = \sin(n(\theta)t)$, где $\theta = (3 \text{ с})^{-1}$;

(3) – колебания зеркал по кубическому закону $x = (n(\theta)t)^3$, где $\theta = (3 \text{ с})^{-1}$;

(4) – колебания зеркал по нелинейной зависимости пятой степени $x = (n(\theta)t)^5$, где $\theta = (3 \text{ с})^{-1}$;

(5) – колебания зеркал по экспоненциальному закону $x = e^{(n(\theta)t)}$, где $\theta = (3 \text{ с})^{-1}$.

Начальное положение зеркал для каждого эксперимента было одинаковым и находилось на отметке $x_{\text{нач.}} = 300\,000$ м; изменялся только закон (линейный, синусоидальный, кубический, нелинейный 5-й степени,

экспоненциальный), по которому зеркала преодолевали расстояние. В случае, когда «колебались» оба зеркала, колебания происходили в противофазе. Для каждого закона был проведен расчет графиков сигнала детектора: когда одно зеркало колеблется, а другое неподвижно; когда оба зеркала осциллируют по заданному закону в противофазе.

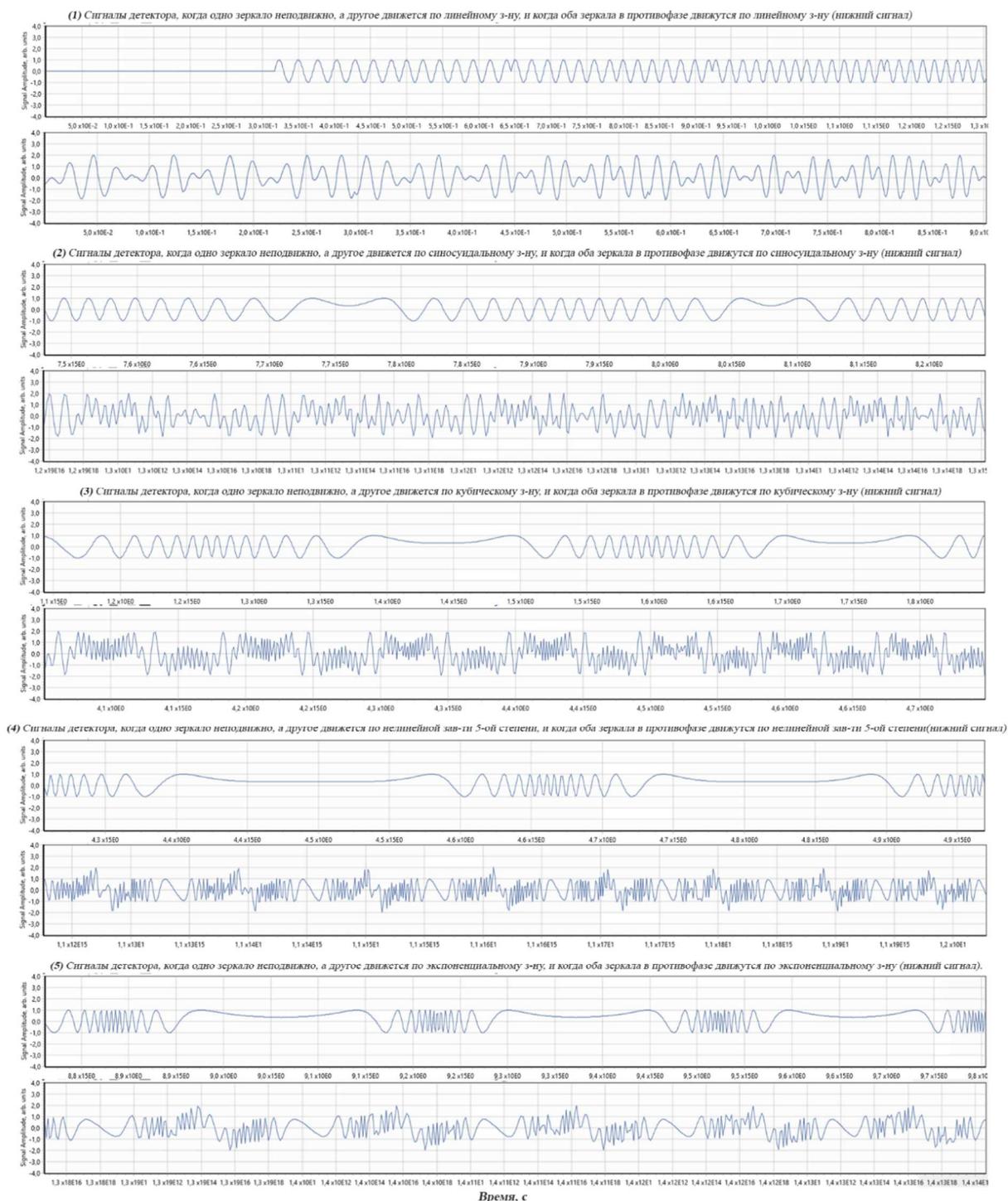


Рисунок 4. – Графики типичных сигналов детектора гравитационных волн при различных характерах колебания отражающих зеркал, рассчитанных в ПО LIGO-RM

Рассмотрим график совместного колебания зеркал (см. рисунок 4). Тип сигнала – незатухающие гармонические колебания длительностью 1136 мс. Амплитуда колеблется от 1,995 до $-1,895$, среднее значение – $0,013$. Видны повторяемые участки с периодичностью 166 мс, следующие друг за другом и образующие весь сигнал. Каждый участок $\sim 1/7$ сигнала и имеет три интервала с переменной частотой,

которые можно классифицировать по изменению крутизны пиков: 1-й интервал – 60 мс, 12 пиков большой крутизны; 2-й интервал – 52 мс, 2 пика малой крутизны (длительность одного – 32 мс); 3-й интервал – 54 мс, 16 пиков большой крутизны. В 1-м и 3-м интервалах частота следования пиков изменяется в ~ 2 раза.

Результаты численного эксперимента при наличии ГВ линейного типа показывают, 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.

На рисунке 5 показан сигнал детектора для высокочастотного колебания зеркал.

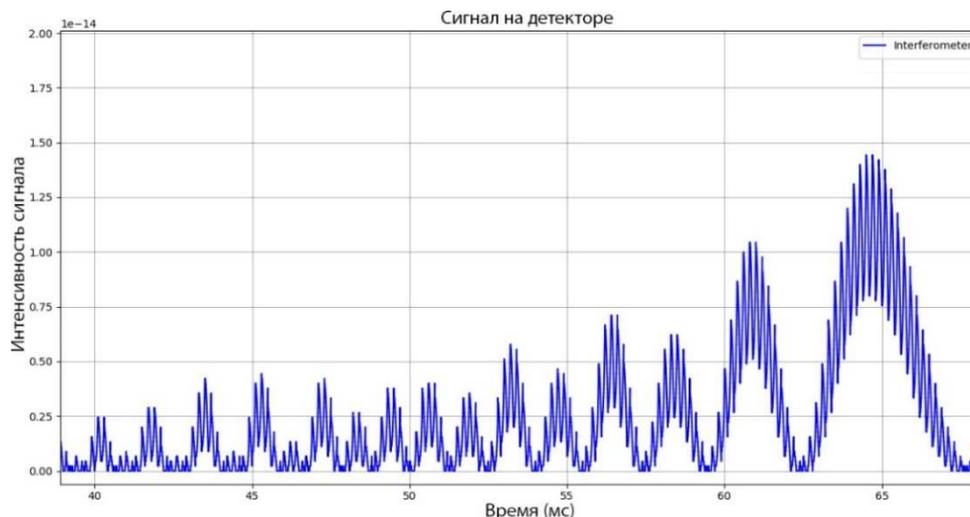


Рисунок 5. – График численного моделирования сигнала детектора с колебанием зеркал высокой частоты

На графике изображен сигнал на детекторе, где одно из зеркал совершает высокочастотные колебания по линейному закону и испытывает воздействие чирпа гравитационной волны. Длина волны лазера – 1024 нм, максимум отклонения зеркала от исходного положения – $1 \cdot 10^{-16}$ м, частота колебаний зеркала – 5 Гц, амплитуда ГВ – 10^{-15} , частота – 100 Гц, угол падения подобран так, что ввиду собственной поляризации ГВ воздействует только на одно плечо детектора.

Разработанное ПО LIGO-RM позволяет проводить широкий спектр экспериментов для всевозможных конфигураций ГВ-детектора и параметров колебания зеркал и получать численную оценку таких экспериментов, определяя достоинства и недостатки различных конфигураций детектора.

Заключение. Ученые находятся на пороге открытия новой области физической науки – гравитационно-волновой астрометрии [4; 11–19], к настоящему времени уже зарегистрировано 67 волн. Появляется большое число проектов гравитационно-волновых обсерваторий на базе лазерного интерферометра, где активно пытаются увеличить его чувствительность, что напрямую связано с неподвижностью отражающих зеркал. В работе предложен новый тип детектора гравитационных волн – детектор с осциллирующими отражающими зеркалами на базе интерферометра Майкельсона. Разработано программное обеспечение LIGO-RM, моделирующее детектор гравитационных волн с осциллирующими зеркалами и позволяющее проводить численный эксперимент. Программа поддерживает моделирование наличия и отсутствия гравитационных волн разного типа, позволяя наблюдать их влияние на работу детектора и численно оценивать его чувствительность. LIGO-RM позволяет задавать любые параметры конфигурации детектора, задавать любой функциональный характер движения-колебания зеркал и его параметры. Выполнены расчеты сигналов детектора с осциллирующими отражающими зеркалами для ряда функциональных зависимостей движения зеркал, результаты отображены на рисунке 4. Показаны сравнительные сигналы гравитационно-волнового детектора при колебании одного зеркала и при совместном колебании двух зеркал в противофазе для различных законов колебаний (см. рисунок 4). Выполнены и визуализированы результаты расчетов сигнала детектора гравитационных волн для двух видов колебаний зеркал: низкочастотного и высокочастотного (см. рисунки 4, 5 соответственно).

ЛИТЕРАТУРА

1. The Nobel Prize : The Nobel Prize in Physics 2017 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2017/summary/>. – Date of access: 12.12.2019.
2. KAGRA Observatory News : KAGRA Gravitational-wave Telescope Starts Observation [Electronic resource]. – Mode of access: <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/archives/1381>. – Date of access: 25.02.2020.
3. Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger / B. P. Abbott [et al.] // The Astrophysical Journal Letters. – 2017. – Vol. 848, No. 2. – 59 p.

4. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger / B.P. Abbot [et al.] // Phys. Rev. Let. – 2016. – Vol. 116, iss. 6. – 061102.
5. Poincare, H. Sur la dynamique de l'électron / H. Poincare // Rend. Circ. Mat. Palermo. – 1906. – Vol. 21, ser. 1. – P. 129–176.
6. Weber, J. Gravitational-wave-detector events / J. Weber // Phys. Rev. Let. – 1968. – Vol. 20, iss. 23. – P. 1307–308.
7. Gertsenshtein, M.E. On the detection of low frequency gravitational waves / M.E. Gertsenshtein, V.I. Pustovoit, // JETP. – 1962. – Vol. 43, No. 2. – P. 605–607.
8. Exploring the sensitivity of next generation gravitational wave detectors / B.P. Abbott [et al.] // Class. Quantum Grav. – 2017. – Vol. 34, No. 4. – 044001.
9. Advanced LIGO : LIGO Scientific Collaboration / LIGO – Livingston : Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, 2014 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1411/1411.4547.pdf>. – Date of access: 1.01.2020.
10. LIGO NEWS : LIGO Suspends Third Observing Run (O3) [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20200326>. – Date of access: 1.04.2020.
11. Sensitivity studies for third-generation gravitational wave observatories / S. Hild [et al.] // Class. Quantum Grav. – 2011. – Vol. 28, No. 9. – 094013.
12. Laser Interferometer Space Antenna : A proposal in response to the ESA call for L3 mission concepts / Albert Einstein Institute ; K. Danzmann [et al.]. – Hannover, 2017. – 41 p.
13. NGO, Revealing a hidden Universe: opening a new chapter of discovery (New Gravitational wave Observatory) : Assessment Study Report / European Space Agency ; O. Jenrich [et al.]. – Paris, 2011. – 153 p. – № ESA/SRE (2011) 19.
14. The Japanese space gravitational wave antenna – DECIGO / S. Kawamura [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. – 2008. – Vol. 122. – 012006.
15. Laser interferometry for the Big Bang Observer / G.M. Harry [et al.] // Class. Quantum Grav. – 2006. – Vol. 23. – P. 4887–4894.
16. 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, iss. 7, id. 35.
17. Yagi, K. Detector configuration of DECIGO/BBO and identification of cosmological neutron-star binaries / K. Yagi, N. Seto // Phys. Rev. D. – 2011. – Vol. 83. – 20 p.
18. Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory. Instrument Science White Paper : LIGO-T1600119–v4 : adopted 27.10.16. – Cambridge : Technical Note : LIGO Scientific Collaboration, 2016. – 116 p.
19. High frequency gravitational wave generator [Electronic resource] : pat. US 10,322,827 B2/ C. Salvatore, P. – Publ. date 18.01.2019. – Mode of access: [https://pdfpiw.uspto.gov/piw?docid=10322827&SectionNum=1&IDKey=59C80614D29C&HomeUrl=http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO2%2526Sect2=HITOFF%2526u=%25252Fmeta.html%25252FPTO%25252Fsearch-adv.htm%2526r=2%2526f=G%2526l=50%2526d=PTXT%2526p=1%2526S1=\(2019\\$.PD.%2526BAND%2526B%252522LIGO%252522\)%2526OS=ISD/2019%2526BAND%2526B%252522LIGO%252522%2526RS=\(ISD/2019%2526BAND%2526B%252522LIGO%252522\)](https://pdfpiw.uspto.gov/piw?docid=10322827&SectionNum=1&IDKey=59C80614D29C&HomeUrl=http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO2%2526Sect2=HITOFF%2526u=%25252Fmeta.html%25252FPTO%25252Fsearch-adv.htm%2526r=2%2526f=G%2526l=50%2526d=PTXT%2526p=1%2526S1=(2019$.PD.%2526BAND%2526B%252522LIGO%252522)%2526OS=ISD/2019%2526BAND%2526B%252522LIGO%252522%2526RS=(ISD/2019%2526BAND%2526B%252522LIGO%252522)). – Date of access: 01.02.2020.

Поступила 03.09.2020

THE RECKONING OF GRAVITATIONAL WAVE DETECTOR SIGNAL INTRODUCING OSCILLATING REFLECTIVE MIRRORS

I. OHRYMENKO, N. KOLCHEVSKY, P. PETROV

The gravitational wave detector with movable mirrors is studied. Operating ground-based detectors (LIGO, etc.) contain reflecting mirrors isolated from vibrations of any kind. However, the mirrors are not static and on the contrary, they are placed in the system of a 4-stage pendulum with a long oscillation period. A model of a GW detector with mirrors oscillating for various functional dependences is proposed. The “LIGO-RM” software has been developed and is available for the numerical simulation of a new type detector. A number of the signal calculations of the gravitational wave detector with oscillating mirrors have been performed using the LIGO-RM program. The parameters used for the calculation are presented and the results of the numerical simulation are discussed.

Keywords: *interferometers, gravitational waves, detector, numerical simulation, LIGO, movable mirrors.*