

Изменения цветовых характеристик поверхности можно добиться при одних и тех же режимах лазерного облучения, варьируя число проходов, что может быть использовано при создании алгоритмов управления процессом цветной маркировки.

## Литература

1. Формирование многоцветного изображения при лазерном окислении металлов / Вейко В. П., Горный С. Г., Одинцова Г. В. и др. // Известия вузов. Приборостроение – 2011. – т.54 – № 2 – С.47–53.
2. Цветная лазерная маркировка поверхности металлов / С. Горный, В. Вейко, Г. Одинцова, Е. Горбунова, А. Логинов, Ю. Карлагина, А. Скуратова, Э. Агеев // Фотоника. – 2013. – № 6/42/. – С.34–44.
3. H. Roozbahani et al.: Color Laser Marking: Repeatability, Stability and Resistance Against Mechanical, Chemical and Environmental Effects / IEEE Access – 2020. – Vol. 8. – P. 214196-214208, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3040744.

**В. В. Беглик, П. Д. Кривошеев, И. П. Охрименко**  
(БГУ, Минск)

Науч. рук.: **Н. Н. Кольчевский**, канд. физ.-мат. наук, доцент,  
**П. В. Петров**, инженер-электроник

## ДЕТЕКТОР ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВ S-LIGOxR-Gy

Впервые, о том, что гравитационное взаимодействие носит волновую природу, было предсказано О. Хэвисайдом в 1865 г. [1]. Гравитационно-волновым детектором считается любая система, регистрирующая малые относительные смещения масс или силы, которые их вызвали. Реализация гравитационных детекторов, действительно способных зарегистрировать гравитационные волны, стала возможной лишь в XX веке [2, 3]. В настоящее время, ведутся разработки наземных детекторов третьего поколения. Einstein Telescope (ET) и Cosmic Explorer (CE) – это проекты наземных детекторов гравитационных волн третьего поколения. Длины плеч ET составят 10 км (3 плеча), а CE - 40 км (2 плеча). Конфигурация ET отличается от LIGO-подобной конфигурации CE тем, что образует равносторонний треугольник под

землей. SE располагается на поверхности земли имея два перпендикулярных плеча.

LISA, DECIGO и BBO – это проекты космических детекторов гравитационных волн, представляющих различный набор детекторов в виде равностороннего треугольника, расположенного на орбите солнца (гелиоцентрическая орбита) и использующие электромагнитный принцип детектирования – лазерный интерферометр Майкельсона с углом  $60^\circ$  между плечами. Отличия между проектами являются: количество треугольных систем из спутников, количество спутников, задействованных в системе детектора, длина плеч интерферометра, количество интерферометров, их ориентация и др. Другой принцип детектирования основан на контроле группы пульсаров (ЕРТА, IРТА, SKA), звездных остатков, которые испускают повторяющиеся импульсы излучения, и ищут тонкие временные сдвиги, вызванные прохождением гравитационных волн.

Предложено исследовать модель околоземного космического детектора гравитационных волн. Космос – условно неограниченное пространство по сравнению с Землей в котором можно разместить детектор большего размера и трехмерной конфигурации. Этот факт открывает доступ к областям спектра ГВ, недоступных для LIGO детекторов, размещенных на Земле. В качестве космического детектора ГВ предлагается космическая измерительная система искусственных спутников (ИС), расположенная на орбитах планет, естественных спутников планет или планетоидах. Для постоянного наземного взаимодействия с космической измерительной системой предложено использовать спутники, расположенные на геостационарных орбитах.

Предлагается модель космического детектора ГВ «S-LIGOxR-Gy» в виде системы из  $X$  спутников, расположенных на  $Y$  орбитах (рисунок 3), тип орбит также варьируется: LO, MO, GO и HO. В работе исследуется детектор S-LIGO8R-G2 (Space – Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) 8 (общее число спутников) Regular (правильной формы) Geostationary (тип орбит) 2(число орбит). Для космического детектора S-LIGO8R-G2, первые 4 спутника выводятся на геостационарную орбиту и отстоят друг от друга на одинаковом расстоянии так, что образуют квадрат, вписанный в круговую орбиту. Вторая конфигурация спутников на ортогональной орбите аналогична первой (рисунок 1). В первом приближении, 4 спутника одной орбиты вращаются вокруг планеты с одинаковой угловой скоростью и сохраняют конфигурацию перпендикулярных плеч интерферометра Майкельсона. Как говорилось выше, всего получается 4 возможных де-

тектора для одной орбиты: каждая вершина является угловой станцией детектора ГВ. Добавление второй орбиты ортогональной первой, переводит систему из двухмерной в более сложную трехмерную, где необходимо учитывать возможные совместные конфигурации в 3D пространстве. Это усложнение системы обеспечивает увеличение числа интерферометров и расширяет диаграмму направленности космического ГВ детектора. Изменения взаимного расположения спутников вызвано их орбитальным вращением. Взаимное расположение спутников и их орбитальное движение рассчитывалось теоретически, а также моделировалось в специализированной программе AGI STK (рисунок 1).

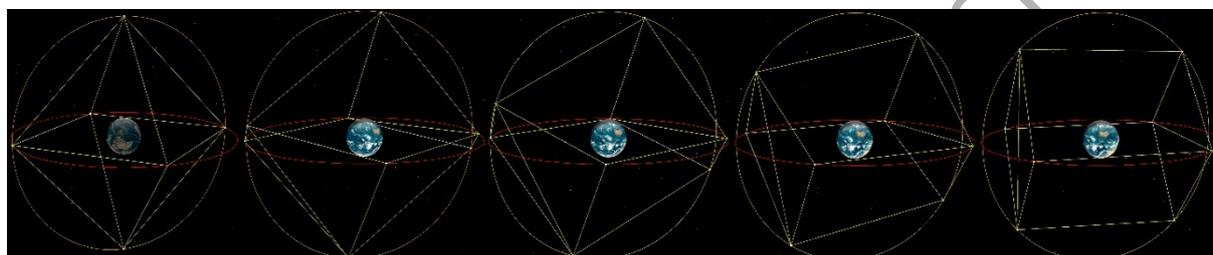


Рисунок 1 – Этапы процесса эволюции системы космического детектора гравитационных волн «S-LIGO8R-G2». В исходной фазе правильная трехмерная фигура октаэдр, и в заключительной фазе: образование правильной фигуры куб

Правильные фигуры, выстраиваемые системой S-LIGO8R-G2 в двух периодически повторяющихся фазах октаэдра и куба, дают множество одновременно функционирующих детекторов ГВ классической конфигурации. Соответственно, система из спутников, расположенных в вершинах куба, расширяют возможности космического детектора ГВ и позволяют переключаться между системами с большим количеством единовременно работающих детекторов (до 24 LIGO-подобных детекторов) и выбором самых «перспективных» детекторов по ряду определяющих факторов: ориентация в пространстве, длина плеч, взаимное расположение и т.д.

### Литература

1. Cervantes-Cota, J. L. A Brief History of Gravitational Waves / J. L. Cervantes-Cota, S. Galindo-Uribarri, G. F. Smoot // Universe. – 2016. – Vol. 2, iss. 3. – P. 22–52.
2. Advanced LIGO [Electronic resource] : LIGO Scientific Collaboration / LIGO – Livingston : Laser Interferometer Gravitational-Wave Ob-

servatory, 2014. – Mode of access: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1411/1411.4547.pdf>. – Date of access: 1.01.2021.

3. LIGO NEWS [Electronic resource] : LIGO Suspends Third Observing Run (O3). – Mode of access: <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20200326>. – Date of access: 1.03.2021.

**Е. А. Бельков**  
(БГУИР, Минск)

Науч. рук. **В. Т. Крушев**, канд. техн. наук, доцент

## **РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ ЯДЕРНОГО КВАДРУПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСА**

Ядерный квадрупольный резонанс (ЯКР) – это резонансное поглощение радиоволн, основанное на взаимодействии градиента электрического поля кристаллической решётки вещества и ядерного квадрупольного момента ядра, вызванного отклонением распределения заряда ядра от сферической симметрии. Взаимодействие квадрупольных моментов ядер с градиентом электрического поля кристаллической решётки вызывает прецессию ядер, частота которой зависит от градиента поля кристаллической решётки, который в свою очередь, зависит от температуры, что позволяет применять ЯКР для измерения температуры.

В последние годы метод ЯКР находит всё большее применение в различной измерительной аппаратуре. На основе этого метода изготавливаются датчики температуры, магнитного поля, давления и т.д. Большая абсолютная точность измерения температуры порядка 0,001 °С делают их незаменимыми при прецизионных измерениях. ЯКР-термометры не требуют периодической поверки и калибровки и могут быть использованы в качестве эталонов температуры, а также на долговременных орбитальных космических станциях и в технологических процессах.

Цель работы заключается в разработке электронного устройства для точного измерения температуры на основе ЯКР. Отличительной особенностью разработки является обеспечение повышенной точности измерения температуры, которая составляет 0,001 °С, а также увеличение диапазона измеряемых температур (минимальная температура – не ниже –100 °С, максимальная температура – до 600 °С).