

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

УДК 535.4; 534.2

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО В ЛАЗЕРНОМ БАЛЛИСТИЧЕСКОМ ГРАВИМЕТРЕ

© Авторы, 2018

doi: 10.25210/jfop-1803-002007

Балашов А. А. — д.т.н., гл.н.с., Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва
Морозов А. Н. — д.ф.-м.н., проф., заведующий кафедрой «Физика», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана; Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН.
E-mail: amor59@mail.ru

Пустовойт В. И. — академик РАН, д.ф.-м.н., проф., научный руководитель, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево. E-mail: vladpustovoi@gmail.com

Аннотация

Проведено математическое моделирование лазерного баллистического гравиметра с встроенным интерферометром Фабри-Перо. Установлено, что при увеличении высоты падения зеркала интерферометра ухудшается глубина оптического отклика. Показана необходимость оптимизации параметров интерферометра Фабри-Перо при его использовании в лазерном баллистическом гравиметре.

Ключевые слова: баллистический гравиметр, интерферометр Фабри-Перо, ускорение свободного падения

Abstract

Mathematical modeling of a laser ballistic gravimeter with a built-in Fabry-Perot interferometer is carried out. It was found that the depth of the optical response deteriorates with increasing height of the interferometer mirror incidence. The need to optimize the parameters of the Fabry-Perot interferometer when it is used in a laser ballistic gravimeter is shown.

Keywords: ballistic gravimeter, Fabry-Perot interferometer, gravity acceleration

Лазерные баллистические гравиметры нашли широкое применение для прецизионного измерения абсолютной величины ускорения свободного падения [1, 2]. С помощью этих гравиметров удается измерять величину ускорения свободного падения на поверхности Земли с точностью до нескольких единиц мкГал (нескольких единиц на $10^{-9} g$) [3, 4]. Поставлена задача добиться абсолютной чувствительности на уровне не хуже 1 мкГал [5].

В качестве измерителя абсолютного значения ускорения свободного падения в лазерных баллистических гравиметрах обычно выступает интерферометр Майкельсона [6]. Целью данной статьи является рассмотрение возможности применения в этих гравиметрах интерферометра Фабри-Перо [7]. Подробный анализ возможности создания гравиметров и градиентометров на основе интерферометра Фабри-Перо выполнен в [8].

Проведем описание лазерного баллистического гравиметра, в подвижное плечо которого включен интерферометр Фабри-Перо. В [9–11] предложен метод математического описания распространения света в интерферометре Фабри-Перо с подвижным зеркалом. В рамках этой модели предполагается, что используемый лазер стабилизирован по частоте ω_c и мощности W_0 и создает на входе в интерферометр Фабри-Перо гармоническую световую волну с волновым числом k_c и амплитудой E_0 . Указанные величины связаны между собой следующими соотношениями:

$$\omega_c = ck_c, \quad (1)$$

$$W_0 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 S c E_0^2, \quad (2)$$

где c — скорость света, ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, S — площадь зеркал интерферометра Фабри-Перо.

Регистрация движения зеркала баллистического гравиметра с помощью интерферометра Фабри-Перо заключается в измерении текущего расстояния между зеркалами интерферометра по изменению мощности прошедшего интерферометр излучения $W_s(t)$. Далее для простоты будем считать зеркала интерферометра Фабри-Перо одинаковыми, имеющими амплитудный коэффициент отражения R и амплитудный коэффициент пропускания η . В современных интерферометрах Фабри-Перо коэффициент отражения R достигает значения 0.999999.

Следуя [9–11], будем считать, что попадающее в интерферометр лазерное излучение описывается монохроматической волной

$$E(t, x) = \frac{1}{2} E_0 \exp[i(\omega_e t - k_e x)] + \text{к.с.}, \quad (3)$$

где i — мнимая единица. Тогда после многократных переотражений из интерферометра Фабри-Перо выйдет излучение, описываемое выражением

$$E_a(t, L) = \frac{1}{2} r^2 E_0 \sum_{n=1}^{\infty} R^{2(n-1)} \exp \left[i \left(\omega_e t - k_e \left(2 \sum_{l=0}^{n-1} (x_2(t - (2l+1)t_0) - x_1(t - 2lt_0)) \right) \right) \right] + \text{к.с.}, \quad (4)$$

где x_1 и x_2 — смещение первого и второго зеркал интерферометра, $t_0 = L/c$ — время однократного прохождения светом расстояния между зеркалами, $L = x_2 - x_1$ — расстояние между зеркалами интерферометра.

Далее будем считать первое зеркало неподвижным $x_1 = 0$, а второе — движущимся с ускорением свободного падения g

$$x(t) = x_2(t) = \frac{1}{2} g t^2, \quad (5)$$

при этом скорость движения зеркала будет равна

$$V(t) = g t \quad (6)$$

или

$$V(t) = \sqrt{2gx(t)}. \quad (7)$$

Если количество переотражений в интерферометре Фабри-Перо равно N , то для наблюдения интерферограммы с хорошей глубиной модуляции необходимо, чтобы время переотражений света в интерферометре

$$\Delta t_1 = 2N \frac{x}{c} \quad (8)$$

было много меньше времени, в течение которого зеркало интерферометра проходит расстояние, равное половине длины волны лазера

$$\Delta t_1 = \frac{\lambda_e}{2V}. \quad (9)$$

Тогда, с использованием формулы (7) имеем

$$x \ll \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda_e^2 c^2}{4gN^2} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (10)$$

При $\lambda_e = 633$ нм (гелий-неоновый лазер) [2] и $N = 100$ получим $x \ll 0.23$ м.

Для простоты будем считать, что фотоприемник, регистрирующий прошедшее интерферометр Фабри-Перо излучение, расположен сразу после второго зеркала и имеет координату L . Тогда мощность регистрируемого фотоприемником прошедшего интерферометр излучения будет определяться выражением

$$W_a(t) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 S c \overline{E_a(t, L) E_a^*(t, L)}, \quad (11)$$

где $E_a^*(t, L)$ — комплексно сопряженная с напряженностью поля $E_a(t, L)$ величина.

Подстановка в формулу (11) выражения (4) с учетом (2) дает

$$W_a(t) = r^2 W_0 \left\{ \left[\sum_{n=1}^{\infty} R^{2(n-1)} \cos \Phi_n(t) \right]^2 + \left[\sum_{n=1}^{\infty} R^{2(n-1)} \sin \Phi_n(t) \right]^2 \right\}, \quad (12)$$

где

$$\Phi_n(t) = 2k_e \sum_{l=0}^{n-1} x(t - (2l+1)t_0). \quad (13)$$

Здесь $k_e = 2\pi/\lambda_e$, λ_e — длина волны лазерного излучения.

Проведем математическое моделирование отклика интерферометра Фабри-Перо при движении зеркала, описываемом формулами (5) и (6). Рассчитаем форму оптического отклика интерферометра Фабри-Перо в зависимости от пройденного падающим телом расстояния x . При этом в расчетных

формулах время переотражений t_0 будет зависеть от расстояния, пройденного зеркалом интерферометра

$$t_0 = \frac{x}{c}. \quad (14)$$

При математическом моделировании будем считать, что длина волны лазера $\lambda_0 = 633$ нм, а коэффициент отражения от зеркал $R = 0.995$ (количество переотражений в интерферометре $N = 100$). Расчет проводился с помощью программы, написанной на языке Borland C++, и заключался в вычислении сумм в формулах (12) и (13) при движении зеркала в поле силы тяжести, описываемом выражением (5).

На рис. 1 приведена форма оптического отклика в случае падения тела с высоты $x_0 = 1$ мм. Хорошо просматривается типичная зависимость оптического отклика интерферометра Фабри-Перо. При этом глубина модуляции достигает величины, близкой к единице.

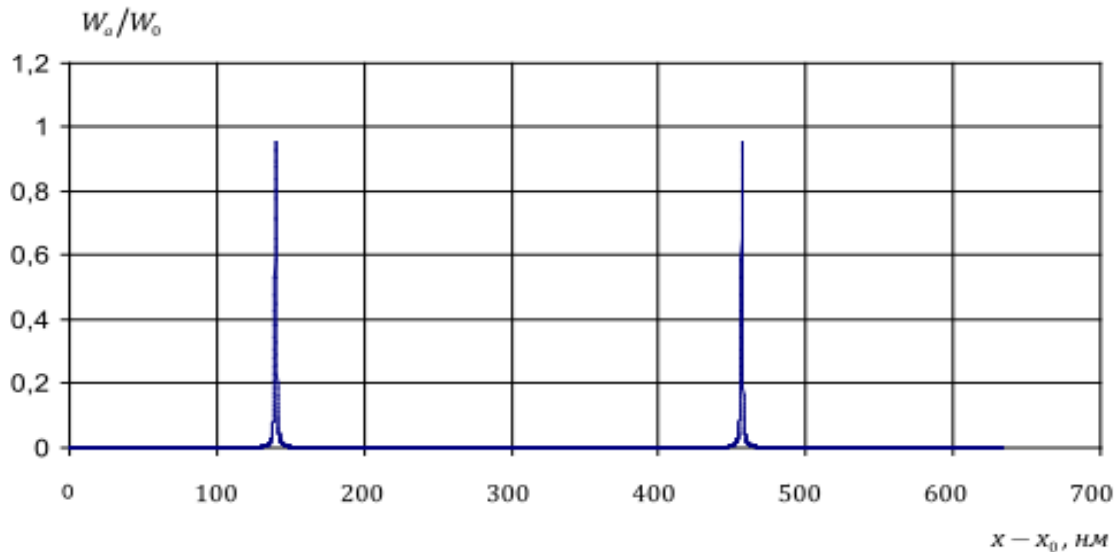


Рис. 1. Зависимость оптического отклика интерферометра Фабри-Перо от перемещения зеркала при $x_0 = 1$ мм.

На рис. 2–5 приведены графики оптического отклика интерферометра Фабри-Перо при различных значениях $x_0 = 3$ мм, $x_0 = 10$ мм, $x_0 = 30$ мм и $x_0 = 100$ мм, соответственно.

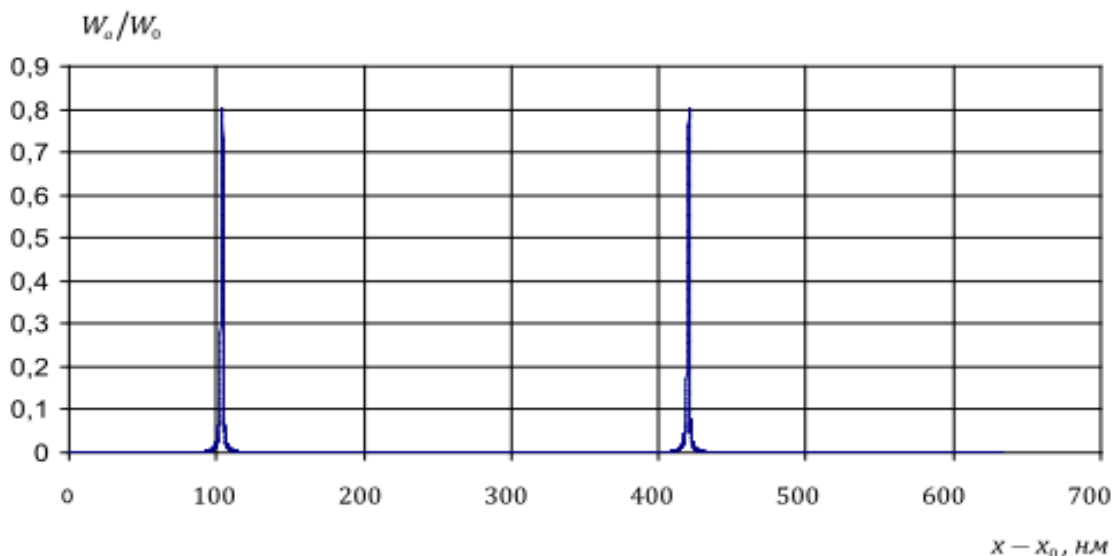


Рис. 2. Зависимость оптического отклика интерферометра Фабри-Перо от перемещения зеркала при $x_0 = 3$ мм.

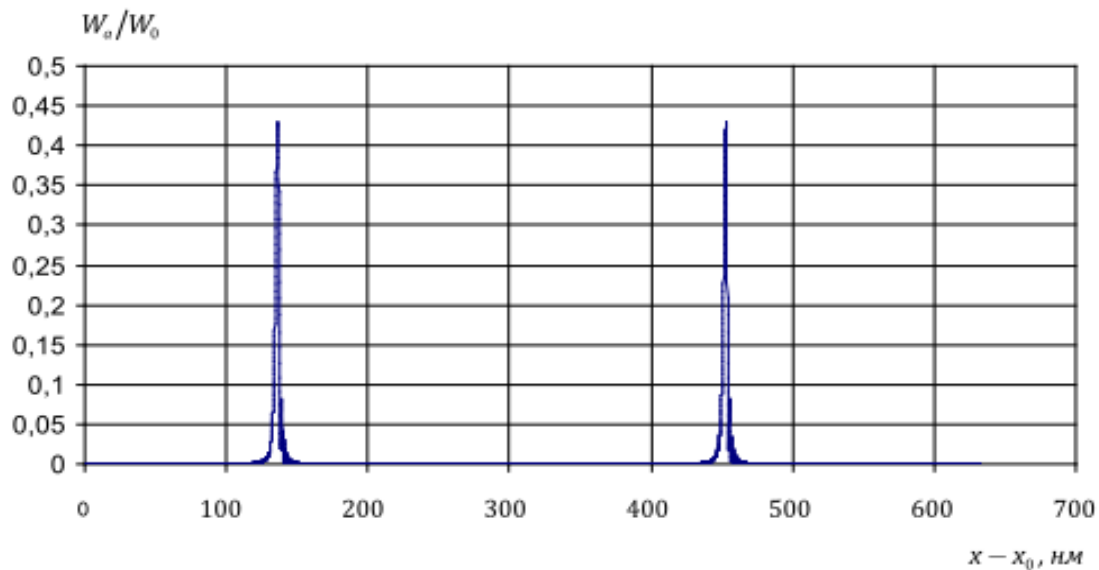


Рис. 3. Зависимость оптического отклика интерферометра Фабри-Перо от перемещения зеркала при $x_0 = 10$ мм.

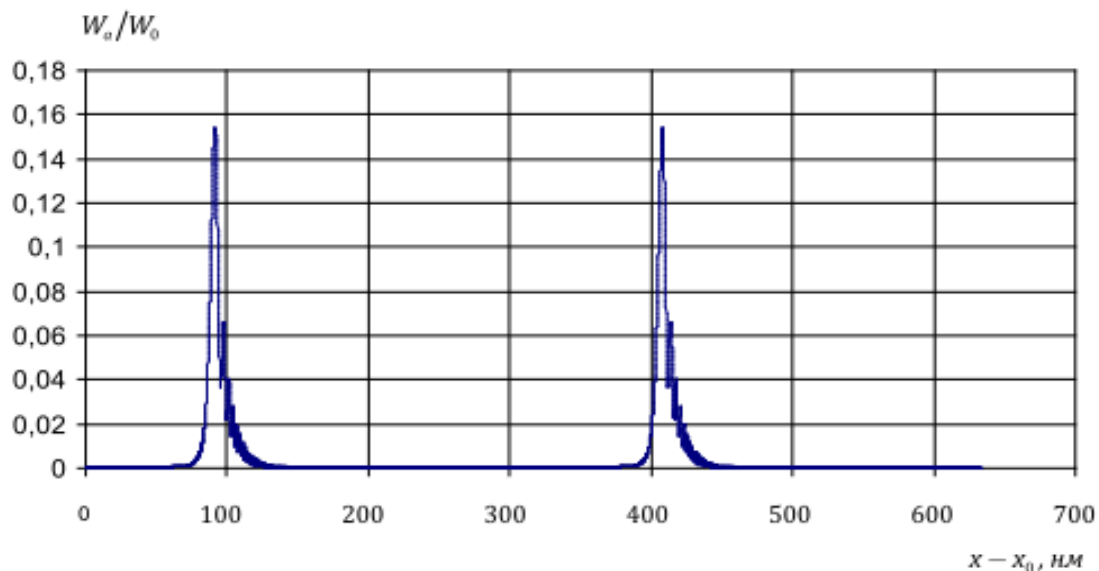


Рис. 4. Зависимость оптического отклика интерферометра Фабри-Перо от перемещения зеркала при $x_0 = 30$ мм.

На этих графиках хорошо просматривается уменьшение оптического отклика интерферометра Фабри-Перо при увеличении высоты x_0 падения зеркала. При высоте падения зеркала $x_0 = 100$ мм глубина оптической модуляции излучения, прошедшего интерферометр Фабри-Перо, уменьшается в 30...40 раз, по сравнению с откликом при падении с малой высоты $x_0 = 1$ мм. Кроме этого начинает наблюдаться переходный процесс после прохождения максимума оптического отклика.

Отметим, что применение данного подхода для определения предельной частоты гравитационной волны f_g , которая может быть зарегистрирована с помощью лазерной интерференционной гравитационной антенны, дает

$$f_g \ll \frac{c}{2NL_0}, \quad (15)$$

где $L_0 = 4000$ м — длина плеча гравитационной антенны LIGO [12]. Подстановка в формулу (15) значений, соответствующих реальным параметрам проекта LIGO, позволяет получить оценку: $f_g \ll 4 \cdot 10^3$ Гц, что подтверждает возможность регистрации гравитационных волн с частотами 100...300 Гц.

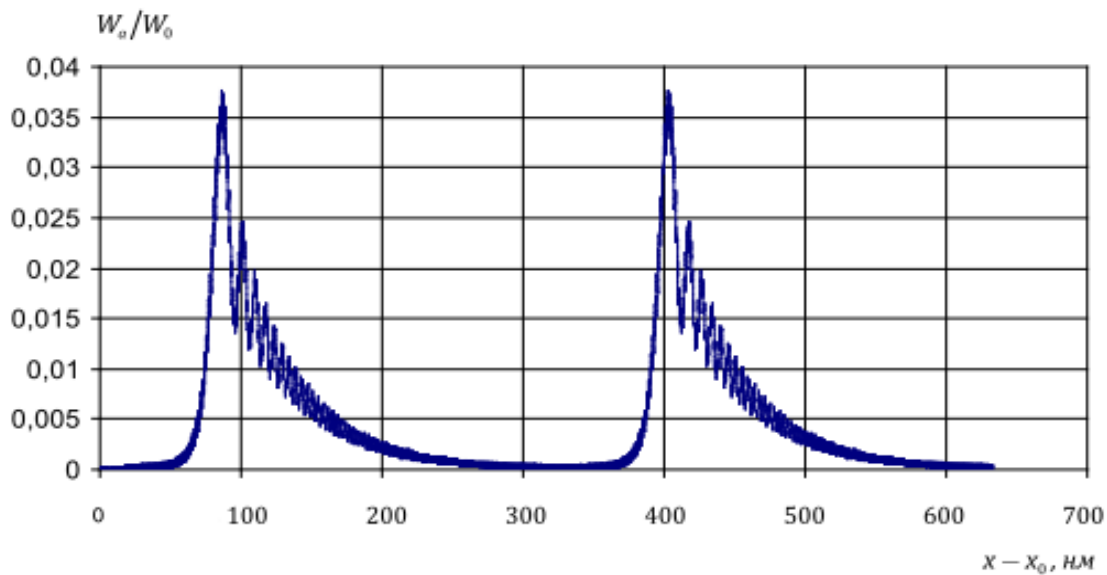


Рис. 5. Зависимость оптического отклика интерферометра Фабри-Перо от перемещения зеркала при $x_0 = 100$ мм.

Таким образом, при применении интерферометра Фабри-Перо в лазерных баллистических гравиметрах необходимо учитывать то, что при движении зеркала с достаточно большой скоростью, что соответствует падению с достаточно большой высоты, время переотражений света в интерферометре становится существенно больше времени, в течение которого расстояние между зеркалами интерферометра увеличивается на величину $\lambda_c/2$. Поэтому для получения выигрыша от применения интерферометра Фабри-Перо в лазерном баллистическом гравиметре требуется оптимизация высоты падения зеркала и количества переотражений света в интерферометре.

Список литературы

1. Веселов К. Е., Сагитов М. У. Гравитационная разведка. М.: Недра, 1969. 512 с.
2. Niebauer, T. M., Sasagawa, G. S., Faller, J. E., Hilt, R., and Klotting, F. A new generation of absolute gravimeters // *Metrologia*. 1995. V. 32. № 3. P. 159–180.
3. Арнаутков Г. П., Калиш Е. Н., Стусь Ю. Ф., Смирнов М. Г. Экспериментальное исследование вариаций ускорения силы тяжести абсолютными лазерными гравиметрами // *Автометрия*. 2004. Т. 40. № 6. С. 19–32.
4. Бунин И. А., Калиш Е. Н., Носов Д. А., Смирнов М. Г., Стусь Ю. Ф. Полевой абсолютный лазерный баллистический гравиметр // *Автометрия*. 2010. Т. 46. № 5. С. 94–102.
5. Global Geodetic Observing System, Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020. Hans-Peter Plag, Michael Pearlman, Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA, USA (Eds.). Springer, 2009. 332 p.
6. Витушкин Л. Ф. Абсолютные баллистические гравиметры // *Гироскопия и навигация*. 2015. № 3. С. 3–12.
7. Canuteson E. L., Zumberge M. A. Fiber-optic extrinsic Fabry-Perot vibration-isolated interferometer for use in absolute gravity meters // *Applied Optics*. 1996. V. 35. № 19. P. 3500–3505.
8. Пустовойт В. И., Давлатов Р. А., Фатеев В. Ф. Лазерные гравиметры на основе интерферометра Фабри-Перо // *Физические основы приборостроения*. 2017. Т. 6. № 3. С. 63–71.
9. Гладышев В. О., Морозов А. Н. Особенности отклика лазерной интерференционной гравитационной антенны на низкочастотные воздействия // *Измерительная техника*. 1990. № 10. С. 26–28.
10. Морозов А. Н. Необратимые процессы и броуновское движение: Физико-технические проблемы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 332 с.
11. Морозов А. Н. Применение интерферометра Фабри-Перо для регистрации высокочастотных флуктуаций метрики пространства-времени // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2012. № 5. С. 24.
12. Пустовойт В. И., Морозов А. Н., Гладышев В. О., Измайлов Г. Н. Лазерные гравитационно-волновые антенны. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2016. 63 с.

Поступила 3 мая 2018.