

УДК 539.371

## ДАТЧИК МАЛЫХ СМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАТОРА ФАБРИ–ПЕРО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ШУМОВ В ПРОТОТИПАХ ПОДВЕСОВ ЗЕРКАЛ ГРАВИТАЦИОННЫХ АНТЕНН

И. А. Биленко, Н. Ю. Лясковская

(кафедра физики колебаний)

E-mail: igor@hbar.phys.msu.ru

**Предложено описание оригинальной экспериментальной установки для регистрации тепловых и избыточных механических шумов в прототипах подвесов зеркал гравитационных антенн и результатов, полученных с ее помощью для подвесов из кварцевых нитей.**

### Введение

Одним из самых амбициозных проектов в современной экспериментальной физике является разработка детекторов гравитационных волн. В настоящее время в США две лазерные интерферометрические антенны, созданные в рамках проекта LIGO [1], начали поиск всплесков гравитационного излучения. Однако, согласно теоретическим оценкам, для надежного обнаружения сигналов, возникающих при астрофизических катастрофах в радиусе 200 Мпс, которые, согласно этим оценкам, могут наблюдаться примерно раз в месяц, чувствительность этих детекторов должна быть повышена как минимум на порядок. Существенным фактором, ограничивающим эту чувствительность, являются случайные колебания зеркал интерферометра (механические шумы), которые выступают в роли пробных масс. Эти шумы могут быть как стационарными, вызываемыми, в частности, тепловыми флуктуациями, так и нестационарными. Согласно флуктуационно-диссипационной теореме, для того чтобы уменьшить уровень шумов теплового происхождения, необходимо уменьшать акустические потери в зеркалах и их подвесах, или, другими словами, повышать добротность всех мод собственных колебаний. Полученные недавно результаты [2, 3] показывают, что переход от подвеса зеркал на стальных проволоках к использованию нитей из высокочистого плавного кварца должен снизить амплитуду шума, вызываемого тепловыми флуктуациями в подвесе примерно в 30 раз.

С другой стороны, возможно появление дополнительного (избыточного) шума нетеплового происхождения. Источником такого шума могут быть рост микротрещин и движение дефектов в материале подвеса под действием приложенного натяжения. Этот шум может быть как стационарным, так и иметь вид редких выбросов. В проведенных ранее экспериментах был обнаружен нестационарный механический шум в сильно натянутых стальных и вольфрамовых проволоках [4]. Используемый в этой работе оптический датчик на основе интерферометра Майкельсона позволил достичь чувствитель-

ности  $2 \cdot 10^{-11}$  см/ $\sqrt{\Gamma\text{ц}}$ , достаточной для регистрации изменений амплитуды тепловых колебаний на частоте основной струнной моды за время, малое по сравнению с временем релаксации (добротность этой моды составляла  $\sim 5 \cdot 10^4$ ). Надо отметить, что микроструктуры стали (поликристалл с выраженной зернистой структурой) и плавного кварца (стекло) принципиально отличаются. Известно, что механические свойства металлов резко меняются, когда прикладывается натяжение, превышающее предел текучести материала. Не совсем ясно, существует ли аналогичный порог натяжения для плавного кварца. Поэтому для ответа на вопрос о наличии и интенсивности избыточных шумов в кварцевых нитях необходимы прямые измерения. В работе [5] была измерена эффективная температура, соответствующая стационарным шумам таких нитей. Полученный результат позволяет говорить о том, что при больших временах усреднения эти шумы являются чисто тепловыми. Однако чувствительность использованного метода не позволяла исследовать их с высоким временным разрешением.

Целью данной работы была разработка и реализация метода регистрации колебаний кварцевых нитей, обладающего чувствительностью лучшей, чем  $1 \cdot 10^{-12}$  см/ $\sqrt{\Gamma\text{ц}}$  в области частот 0.5–2 кГц, и исследование с его помощью собственных колебаний на высокочастотных ( $Q \sim 10^7$ ) струнных модах.

### 1. Метод измерений и технология изготовления образцов

Средняя амплитуда стационарных тепловых колебаний осциллятора равна

$$\bar{A} = \sqrt{\frac{2kT}{m^*\omega^2}}, \quad (1)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура,  $m^*$  — эффективная масса осциллятора,  $\omega$  — частота колебаний. Среднеквадратичное отклонение этой амплитуды за время измерения  $t$ , малое по сравнению со временем релаксации  $\tau^*$ :  $\sqrt{A_t^2} \simeq \bar{A}\sqrt{2t/\tau^*}$ .

В нашем случае осциллятор — это нить диаметром 60–100 мкм, длиной 10 см с сваренным в центре зеркалом (см. ниже) при нагрузке 10% от разрывной. Для такого осциллятора частота основной поперечной моды  $\omega \approx 2\pi \times 700$  Гц, его добротность  $Q \sim 10^7$  (рекордная величина, полученная для основной струнной моды однородной нити, —  $5 \cdot 10^8$  [3]), следовательно,  $\tau^* \approx 5 \cdot 10^3$  с. Интерес представляют измерения вариаций амплитуды за короткие времена (вплоть до  $t \approx 2\pi/\omega$ ). В нашем эксперименте время измерения было выбрано  $t = 0.2$  с, чтобы выполнялось условие:

$$S_x < \overline{A}_t \sqrt{t} \approx 2 \cdot 10^{-12} \text{ см}/\sqrt{\text{Гц}}, \quad (2)$$

где  $S_x$  — спектральная чувствительность регистрирующей системы на частоте  $\omega$ .

Кроме высокой чувствительности необходимо, чтобы разрабатываемая установка для измерения малых смещений соответствовала следующим требованиям. Во-первых, она не должна была вносить дополнительные механические потери в образец, чтобы сохранить высокую добротность струнных мод. Для этого использовалась конструкция подвеса, полностью выполненная из плавленного кварца [5]. Во-вторых, в процессе измерений необходимо поддерживать постоянное натяжение в образце с учетом его возможного удлинения. Мы использовали резонатор Фабри–Перо, одним из зеркал которого является маленький кварцевый ромб с напыленным отражающим покрытием, сваренный в центр исследуемой кварцевой нити. Его размеры ( $4 \times 2 \times 0.5$  мм) выбирались так, чтобы его масса была порядка массы исследуемой нити. Если считать, что единственным фактором, ограничивающим чувствительность, является дробовой фотонный шум, то минимальная величина, которую можно достичь с помощью данного метода, равна

$$S_x^{\min} \sim \frac{\lambda}{2F} \sqrt{\frac{\hbar\omega}{qW}} = 3 \cdot 10^{-14} \frac{\text{см}}{\sqrt{\text{Гц}}},$$

где  $\lambda = 0.63 \cdot 10^{-4}$  см — длина волны He-Ne лазера,  $\hbar\omega$  — энергия кванта излучения,  $W \approx 0.06$  мВт — мощность излучения, падающая на детектор,  $q \approx 0.5$  — квантовая эффективность детектора,  $F \approx 100$  — резкость резонатора Фабри–Перо. По сравнению с однолучевыми оптическими датчиками данная схема дает выигрыш примерно в  $2F$  раз. В то же время ее динамический диапазон составляет  $\lambda/2F$  см, поэтому максимальное относительное перемещение зеркал во время измерений не должно превышать этой величины. Кроме того, надо разработать технологию приварки, обеспечивающую сохранность отражающего покрытия на маленьком зеркале.

Образцы изготавливались в следующей последовательности. Сначала делались ромбические подложки с глубокой оптической полировкой плоских

поверхностей. Затем в пламени миниатюрной кислородно-водородной горелки к их острым углам приваривались кварцевые «усики» толщиной 200–500 мкм и длиной 3–4 мм. Далее на подложки напылялось многослойное диэлектрическое отражающее покрытие. После этого вытягивались заготовки нитей и с помощью миниатюрной горелки осуществлялась их приварка к «усикам».

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Источником накачки служил He-Ne лазер ЛГН-302 мощностью 1 мВт, излучение которого проходило через систему оптических изоляторов, амплитудный модулятор и светоделитель к оптоволоконному вводу и по одномодовому волокну подавалось внутрь вакуумной камеры. Часть излучения из светоделителя подается на детектор, сигнал с выхода которого через усилитель и фильтр подается на модулятор, образующий цепь стабилизации интенсивности.

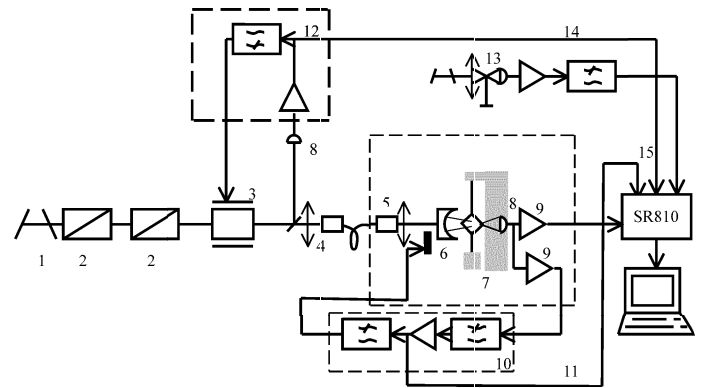


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 — лазер; 2 — оптический изолятор; 3 — модулятор; 4 — оптоволоконный ввод; 5 — оптическое согласование; 6 — сферическое зеркало; 7 — подвижное зеркало; 8 — фотодетектор; 9 — маломощные предусилители; 10 — усилитель обратной связи; 11 — канал контроля обратной связи; 12 — усилитель стабилизации амплитуды; 13 — датчики собственных вибраций; 14 — канал контроля интенсивности лазера; 15 — фазочувствительный вольтметр

Из волокна излучение через согласующую шаровую линзу подавалось в интерферометр со стороны сферического зеркала. Со стороны подвижного зеркала установлен фотодетектор. Сигнал с фотодетектора подавался на два маломощных предусилителя, расположенных в непосредственной близости от него. Выход одного из них подключен к фазочувствительному вольтметру, регистрирующему сигнал на частоте колебаний нити. Выход другого подавался на усилитель обратной связи, управляющий напряжением на пьезокерамической подаче, с помощью которой можно в небольших пределах ( $0 \div 5$  мкм) перемещать сферическое зеркало. Наличие цепи обратной связи позволяло осуществлять настройку интерферометра таким образом, чтобы рабочая точка оказывалась на склоне его резонансной кривой. Из-за потерь в оптических элементах, неидеального согласования моды волокна с интерферометром и потерь в зеркалах максимальная мощность, падающая

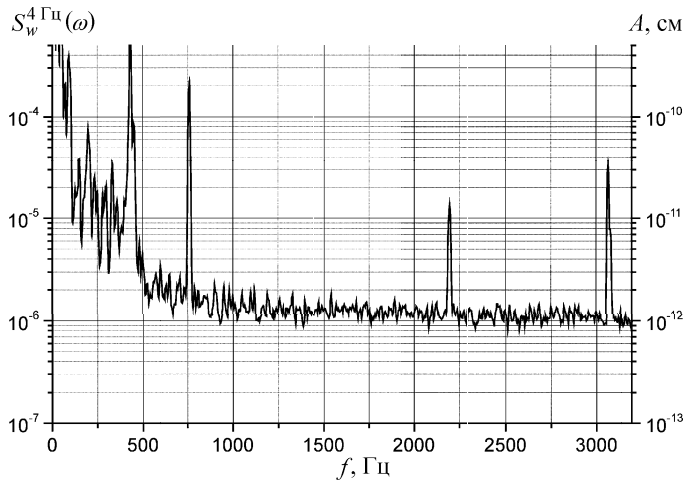


Рис. 2. Типичный спектр выходного сигнала (время измерения — 0.25 с, резкость интерферометра  $F \approx 30$ ). На правой оси приведены соответствующие амплитуды колебаний подвижного зеркала

на детектор, составляла 5% от мощности лазера. Типичный спектр сигнала на выходе предусилителя приведен на рис. 2.

Пик на частоте 760 Гц соответствует основной поперечной моде (струнные колебания нити с дополнительной сосредоточенной массой в центре). Поскольку точка отражения луча в интерферометре находилась ниже геометрического центра зеркала, можно было наблюдать также моду, соответствующую вращению зеркала в вертикальной плоскости (пик на частоте 2.2 кГц).

## 2. Результаты измерений

В процессе исследований были сделаны записи амплитуды собственных колебаний для 11 образцов диаметром от 70 до 200 мкм при нагрузках от 4 до 40% от разрывной общей длительностью около 65 ч. Для каждого образца запись состояла из фрагментов длиной  $(2 \div 4) \cdot 10^3$  с, после записи каждого фрагмента производилась калибровка датчика. Пример одного такого фрагмента приведен на рис. 3. На врезке показана часть этого фрагмента длительностью 1 с. Видно, что вариации амплитуды за малые времена много меньше средней амплитуды колебаний. На это же указывает вид энергетического спектра для амплитуды колебаний (рис. 4). Пик на частоте 2.2 Гц соответствует собственной частоте антисейсмического фильтра и говорит о наличии паразитной модуляции сигнала с этой частотой.

Все записи производились в ночное время для уменьшения влияния микросейсмике. При обработке записей исключалось от 0 до 30% времени — интервалы, в течение которых флуктуации интенсивности лазера, шум в цепи обратной связи или на выходе сейсмометра увеличивались более чем в 3 раза по сравнению со средним значением.

После этого для каждого фрагмента вычислялись средняя амплитуда колебаний  $\bar{A}$  и среднеквадратичное отклонение амплитуды  $\overline{A_t^2}$  за единичный

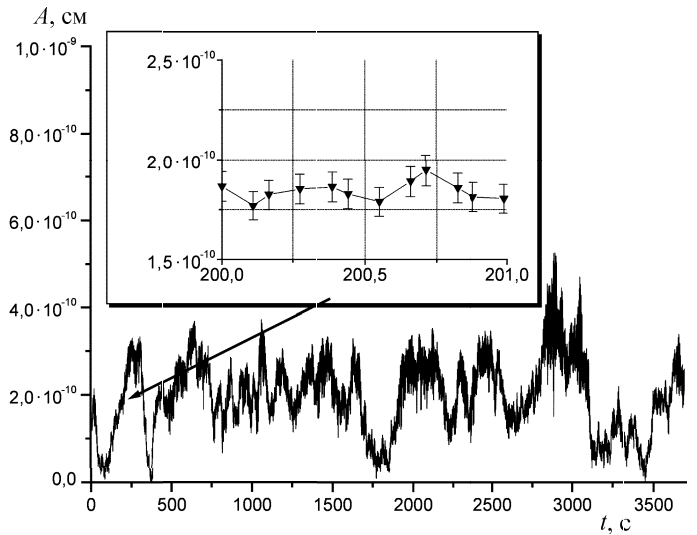


Рис. 3. Зависимость амплитуды колебаний нити на основной поперечной моде от времени

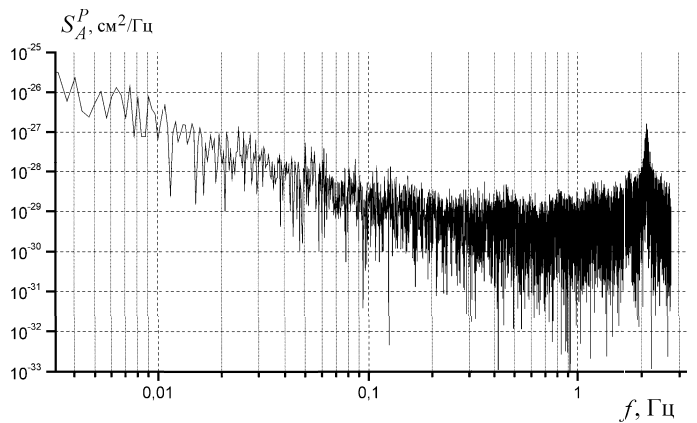


Рис. 4. Энергетический спектр амплитуды колебаний

интервал, равный времени измерения  $t$ . В случае тепловых колебаний распределение вариаций амплитуды подчиняется нормальному закону [6]:

$$P[A_t] \cong \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{A_t^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (3)$$

причем  $\sigma = \sqrt{\overline{A_t^2}}$ . Математическое ожидание количества интервалов, для которых измеренное значение изменения амплитуды будет удовлетворять условию  $X \leq A_t < X + \Delta X$ :

$$N(X, \Delta X) = N_0 \Delta X P[X + \Delta X/2], \quad (4)$$

где  $N_0$  — полное количество интервалов,  $\Delta X \ll X$ .

На рис. 5 приведены гистограмма для одного из фрагментов для  $X \in [-5\sigma, 5\sigma]$ ,  $\Delta X = \sigma/10$ , а также теоретическая функция распределения и границы, в которых должно находиться число  $N$  с вероятностью  $P_\alpha > 0.99$ . Хотя наблюдается небольшое отличие полученного распределения от расчетного, изменений амплитуды, превышающих  $5\sigma$  за единичный интервал, не было.

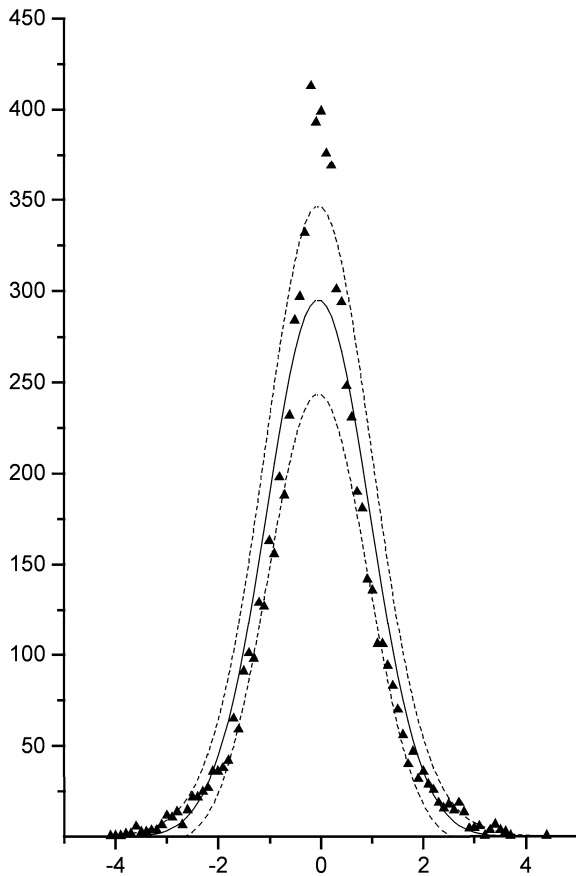


Рис. 5. Гистограмма для изменений амплитуды за единственный интервал времени (0.2 с). По оси  $x$  отложены величины изменений в единицах  $\sigma$  (шаг  $0.1\sigma$ ), по оси  $y$  — количество таких событий. Сплошная линия — математическое ожидание, пунктирные — доверительные границы

Схожее поведение наблюдалось для всех исследованных образцов.

Таким образом, можно утверждать, что возникновение больших скачков амплитуды колебаний нитей подвеса ( $A_t > 10\sigma$ ), способных имитировать сигнал в гравитационных детекторах при натяжениях нитей до 40% от разрывного, представляется маловероятным. В то же время следует подчеркнуть, что данный результат является предварительным, поскольку временное разрешение, ограниченное чувст-

вительностью регистрирующей системы, было примерно на порядок хуже, чем у этих детекторов. Исчерпывающий же анализ механических шумов в таких системах является очень сложной задачей и требует повышения чувствительности и накопления большего объема экспериментальных данных.

### Выводы

Создана оригинальная экспериментальная установка для регистрации тепловых и избыточных механических шумов в прототипах подвесов зеркал гравитационных антенн из плавленого кварца. Максимальная чувствительность составила  $1 \times 10^{-12}$  см/ $\sqrt{\text{Гц}}$  на частоте 1 кГц, менее  $5 \times 10^{-13}$  см/ $\sqrt{\text{Гц}}$  на частотах, больших, чем 2 кГц. Проведенные измерения позволяют заключить, что при нагрузках менее 40% от разрывной колебания прототипов подвесов в основном определяются равновесными тепловыми флуктуациями.

Авторы выражают глубокую благодарность проф. В. Б. Брагинскому за постоянный интерес к работе и проф. В. П. Митрофанову за ценные советы. Работа выполнена при финансовой поддержке NSF США (грант RNY-0098715) и РФФИ (грант 03-02-16975).

### Литература

1. Abramovici A., Althouse W., Camp J. et al. // Phys. Lett. A. 1996. **218**. P. 157.
2. Braginsky V.B., Mitrofanov V.P., Vyatchanin S.P. // Rev. Sci. Instr. 1994. **65**. P. 3771.
3. Willems P., Sannibale V., Weel J., Mitrofanov V. // Phys. Lett. A. 2002. **297**. P. 37.
4. Bilenko I.A., Ageev A.Yu., Braginsky V.B. // Phys. Lett. A. 1998. **246**. P. 479.
5. Bilenko I.A., Lourie S.L. // Phys. Lett. A. 2002. **305**. P. 31.
6. Брагинский В.Б. Физические эксперименты с пробными телами. М., 1970.

Поступила в редакцию  
04.11.03