

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК МАЛЫХ КОЛЕБАНИЙ КРУТИЛЬНЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

© 2013 г. Д. В. Кошцов, Л. Г. Прохоров, В. П. Митрофанов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

Поступила в редакцию 27.04.2012 г.

После доработки 25.06.2012 г.

Описан интерферометрический датчик угла поворота пластинки крутильного механического осциллятора. Датчик выполнен на основе интерферометра Майкельсона, компактен, обеспечивает компенсацию частотных и амплитудных флуктуаций источника оптического излучения и имеет высокую чувствительность. Основное назначение датчика – исследование флуктуаций угла поворота в крутильных осцилляторах. На частотах в области 60 Гц продемонстрирована чувствительность $\sim 5 \cdot 10^{-11}$ рад/ $\sqrt{\text{Гц}}$, ограниченная сейсмическими шумами, действующими на крутильный осциллятор. Потенциальная чувствительность датчика, ограниченная шумами фотодетекторов, составляет $\sim 10^{-11}$ рад/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Датчик также может быть использован в устройствах, где необходимо измерять малые дифференциальные смещения зеркал.

DOI: 10.7868/S003281621301031X

Крутильные механические осцилляторы применяются в различных физических исследованиях, например в магнитометрии [1], для изучения диссипации и турбулентности в сверхтекучем гелии [2] и дислокационного движения в квантовых кристаллах [3], гравитационного взаимодействия [4, 5] и т.д. В экспериментах с крутильными осцилляторами важную роль играет датчик, с помощью которого регистрируются колебания осциллятора. Он должен обладать высокой чувствительностью и малым обратным влиянием. Для этих целей обычно используются оптические системы регистрации, в основе которых либо непосредственное измерение отклонения отраженного зеркалом луча с помощью секционированного фотодиода [6], либо автоколлиматор [7] или интерферометр [8, 9]. В представленной работе описан интерферометрический датчик, позволяющий регистрировать колебания крутильного осциллятора с амплитудой $\sim 10^{-10}$ рад.

Осциллятор целиком изготовлен из кварцевого стекла и представляет собой пластинку размером $25 \times 10 \times 2$ мм, к которой приварены кварцевые нити диаметром ~ 200 мкм. Свободные концы нитей приварены к раме, также изготовленной из кварцевого стекла. Конструкция крутильного осциллятора показана на вставке к рис. 1. Резонансная частота осциллятора $f_r = 63.1$ Гц, добротность $Q \approx 1600$ при колебаниях на воздухе при атмосферном давлении. Спектральная плотность мощности момента флуктуационной силы, обусловленной тепловым шумом и действующей на данный осциллятор в соответ-

ствии с формулой Найквиста для механических систем, составляет $S_M \approx 2 \cdot 10^{-28}$ Н² · м²/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Это соответствует значению линейной спектральной плотности флуктуаций угла поворота пластинки $\sqrt{S_\theta} \approx 3 \cdot 10^{-9}$ рад/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на резонансной частоте осциллятора и значению $\sqrt{S_\theta} \approx 10^{-12}$ рад/ $\sqrt{\text{Гц}}$, например, на частоте 100 Гц.

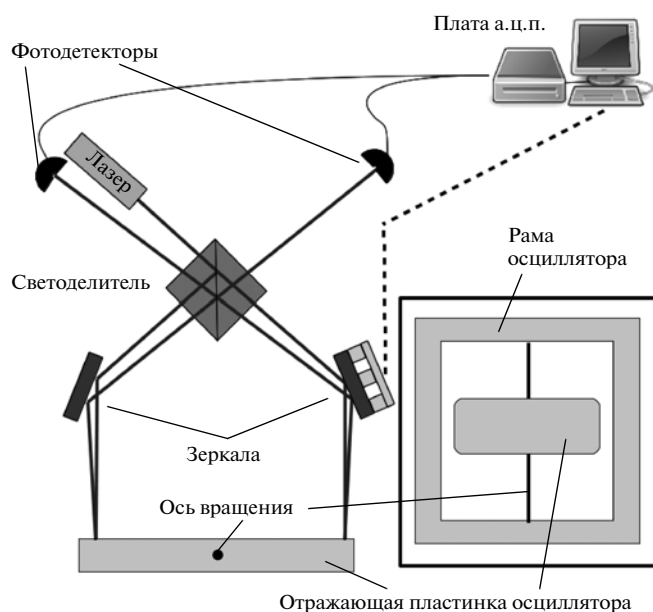


Рис. 1. Блок-схема интерферометрического датчика.

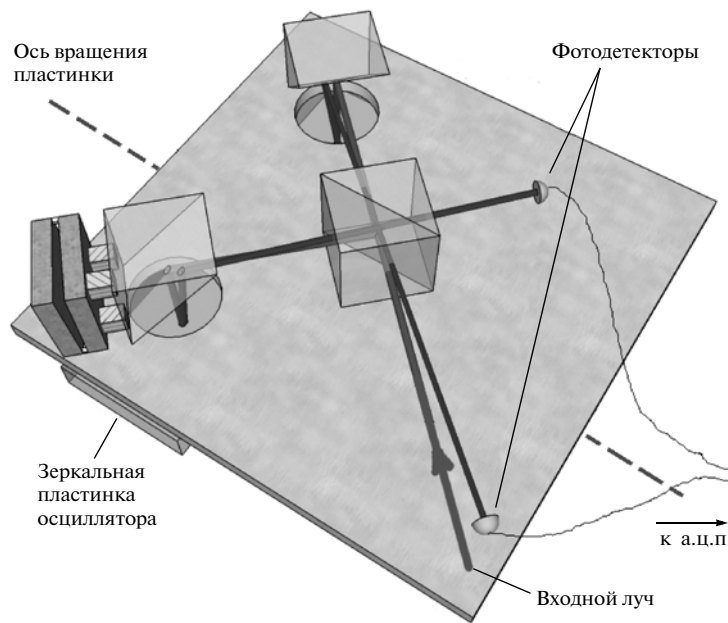


Рис. 2. Трехмерная модель интерферометра.

На одну из сторон кварцевой пластинки напылено диэлектрическое зеркало. Две половины этого зеркала служат в качестве подвижных зеркал, установленных в плечах интерферометра Майкельсона. При колебаниях осциллятора зеркала движутся в противофазе. Конструкция интерферометра показана на рис. 1. Луч гелий-неонового лазера направляется на светоделительный кубик, после которого оба луча отражаются двумя дополнительными зеркалами, выполненными в виде призм, так что отраженные лучи идут параллельно друг другу в плоскости, перпендикулярной начальной плоскости расположения лучей. Затем лучи, отражаясь от зеркальной поверхности маятника, еще раз отклоняются на 90° теми же зеркалами, снова проходят через светоделитель и попадают на фотодетекторы. Вся конструкция закреплена на пластине размером 100×100 мм. Трехмерное схематическое изображение пластины, на которой закреплены светоделитель и отклоняющие призматические зеркала, представлено на рис. 2.

Для уменьшения влияния частотных шумов источника оптического излучения на чувствительность интерферометра длины его плеч делаются примерно равными. Достоинством данной конструкции является также то, что изменение разности хода лучей происходит только при поворотах пластинки-зеркала. При ее перемещении параллельно самой себе длины плеч интерферометра изменяются на одну и ту же величину и не влияют на разность хода лучей. Это позволяет сделать систему нечувствительной к флуктуа-

ям положения измеряемого объекта при измерениях малых углов. Кроме того, это дает выигрыш в два раза по чувствительности по сравнению со схемой интерферометра с неподвижным зеркалом. Как показано на рис. 1, в интерферометре используются два выходных луча, попадающие на два фотодетектора. При малых углах поворота зеркальной пластинки токи фотодетекторов I_1 и I_2 зависят от смещения зеркал $\Delta x_1 = -\Delta x_2 \approx \theta L/2$ в местах падения световых лучей и определяются следующим выражением:

$$I_{1,2} \sim \frac{P_0}{2} \left(1 \pm \cos \left(\frac{2\pi(\Delta l + 2\theta L)}{\lambda} \right) \right), \quad (1)$$

где L — расстояние между точками на зеркальной пластинке, от которых отражаются лучи; θ — угол поворота пластинки; P_0 — мощность оптического излучения, падающего на светоделитель; λ — длина волны оптического излучения. Интерферометр настраивается таким образом, что начальная разность хода лучей Δl (при $\theta = 0$) приводит к обращению в нуль функции косинуса в формуле (1). При этом реализуется наиболее линейный участок его характеристики.

Настройка интерферометра и установка рабочей точки производятся при помощи одного из отклоняющих зеркал, которое сделано подвижным. Изменяя его положение, можно изменять длину соответствующего плеча и положение отраженного луча. Подстройка положения зеркала выполнена в виде двухступенчатой системы подвижек. Грубая подстройка осуществляется при по-

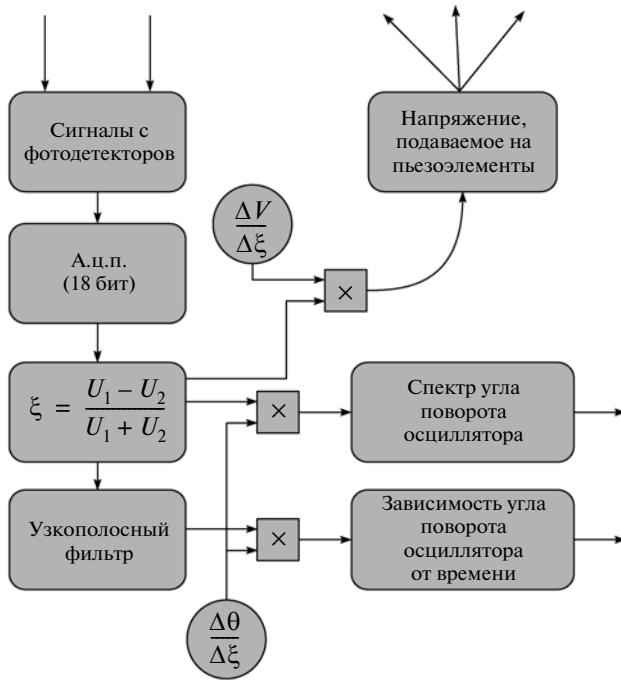


Рис. 3. Блок-схема обработки данных.

мощи наклонной платформы, позволяющей с помощью винтов изменять угол поворота зеркала по двум направлениям. Точная подстройка осуществляется при помощи трех пьезоподач AE0203D04 (Thorlabs), представляющих собой параллелепипеды размером $3.5 \times 4.5 \times 5$ мм, состоящие из нескольких соединенных между собой слоев пьезокерамики. Пьезоподача удлиняется при максимально допустимом напряжении (150 В), подаваемом на ее электроды, на 4.6 ± 1.5 мкм, т.е. для изменения ее длины в пределах длины волны лазерного излучения достаточно подстройки напряжения в пределах 20 В.

Грубая подстройка используется для начального сведения выходных лучей. Пьезоподачи расположены так, что при изменении длин всех трех подач на одну и ту же величину зеркало перемещается параллельно самому себе. Использование пьезоподач обеспечивает возможность как последующего более точного сведения лучей (удлинение соответствующей пьезоподачи при неизменных остальных двух), так и точной подстройки разности длин плеч, не сбивающей настроенного положения отраженных лучей (при изменении длины всех трех пьезоподач на одну и ту же величину). Для каждой пьезоподачи установлен отдельный источник напряжения.

Используя источники напряжения, управляемые от компьютера, данную систему легко перевести в автоматический режим на основе обратной связи. Настройка интерферометра, сбор и об-

работка данных осуществляются программой, написанной в среде LabView® (см. рис. 3). Сигналы с фотодетекторов U_1 и U_2 подаются на 18-разрядный аналого-цифровой преобразователь NI PCI-6280 (National Instruments). При обработке цифрового сигнала вычисляется величина $\xi = (U_1 - U_2)/(U_1 + U_2)$. Для определения напряжения, которое необходимо подать на пьезоэлементы, чтобы скомпенсировать разницу напряжений на фотодетекторах и тем самым восстановить рабочую точку, необходимо знать коэффициент преобразования напряжения, подаваемого на пьезоподачу, в изменение ее длины $\Delta x/\Delta V$ и коэффициент, связывающий величину ξ с Δx – смещением зеркала интерферометра ($\Delta x/\Delta \xi = \lambda/8\pi$ в линейном приближении). Однако проще и точнее определить результирующий коэффициент $\Delta V/\Delta \xi = (\Delta x/\Delta \xi)/(\Delta x/\Delta V)$ экспериментально, измеряя изменение ξ при изменении на заданную величину напряжения, подаваемого на пьезоподачу. Данная операция проводится перед началом измерений.

При малых углах поворота пластинки ($\theta \ll \ll \lambda/4L$) величина ξ пропорциональна углу отклонения. Коэффициент пропорциональности в линейном приближении ($\Delta \theta/\Delta \xi$ на рис. 3) может быть вычислен из формулы (1): $\Delta \theta/\Delta \xi = \lambda/4\pi L$, а также измерен экспериментально с использованием периодической зависимости выходных напряжений от разности хода лучей в интерферометре. Величина ξ в первом приближении не зависит от мощности излучения лазера, что позволяет значительно ослабить влияние флуктуаций мощности излучения на предельную чувствительность датчика.

В блоке обработки сигнала реализован цифровой перестраиваемый узкополосный фильтр для выделения необходимой полосы частот входного сигнала. Программа вычисляет зависимость угла поворота осциллятора от времени и статистические характеристики угла поворота: спектральную плотность флуктуаций угла поворота, его среднее значение, стандартное отклонение и др. Эти данные могут быть сохранены в оцифрованном виде на жестком диске для последующего анализа.

Основными ограничениями чувствительности созданного датчика являются шумы в фотодетекторах PDA36A-EC (Thorlabs) и встроенных в них усилителях, а также флуктуации мощности и частоты излучения лазера 05-STP-903 (Melles Griot). Шум обратного влияния, связанный с радиационным давлением, мал, и им можно пренебречь. Шумы, генерируемые фотодетекторами при подаче на них излучения лазера, были измерены экспериментально путем исключения из датчика интерферометра: луч лазера разделялся на светоделите-

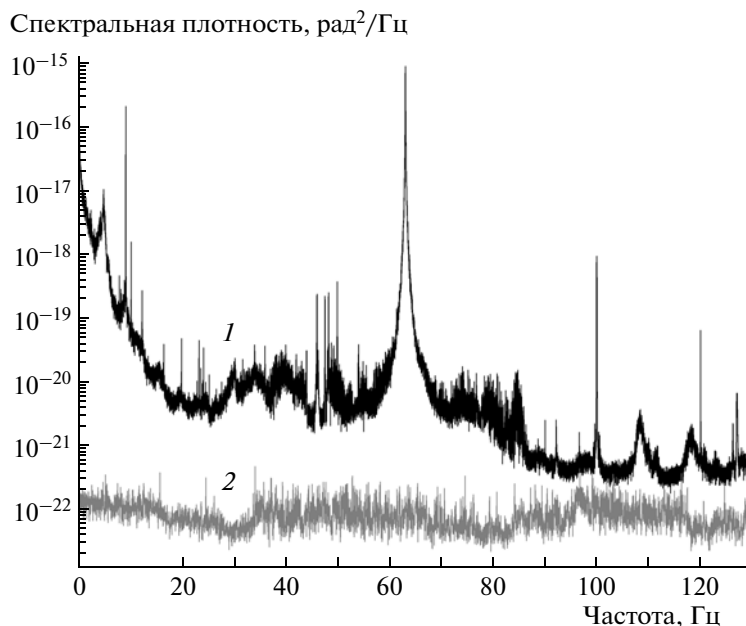


Рис. 4. Спектральная плотность мощности: 1 – флуктуаций угла поворота пластинки осциллятора, возбуждаемого сейсмическими возмущениями; 2 – шумов фотодетекторов при подаче на них излучения лазера, приведенных к спектральной плотности угла поворота пластинки осциллятора.

ле и попадал непосредственно в фотодетекторы. Спектральная плотность этих шумов, приведенная к спектральной плотности угла поворота пластинки осциллятора, представлена на рис. 4 (кривая 2). Отсюда можно сделать вывод, что шумы фотодетекторов ограничивают чувствительность датчика, в среднем, на уровне $\sqrt{S_{\theta,noise}} \approx 10^{-11}$ рад/ $\sqrt{\text{Гц}}$ в диапазоне частот до 120 Гц.

Для экспериментального определения чувствительности созданного датчика были выполнены измерения спектральной плотности мощности флуктуаций угла поворота крутильного осциллятора. Измерения проводились на воздухе, установка была размещена на оптическом столе Standa Optomechanics с пневматической системой виброизоляции IVIS95 для ослабления сейсмических возмущений. Согласно спецификации, на частоте 60 Гц данная система обеспечивает ослабление сейсмических возмущений в $\sim 10^2$ раз по вертикали и в $\sim 10^3$ раз по горизонтали. Были измерены флуктуации угла поворота пластинки осциллятора, когда к последнему не прикладывались никаких регулярных воздействий. В результате проведенных измерений получен график спектральной плотности мощности угла отклонения осциллятора, представленный на рис. 4 (кривая 1), из которого можно сделать вывод, что сейсмические возмущения являются в данном эксперименте доминирующим источником шумового воздействия на осциллятор. На собственной частоте колебаний осциллятора $f_r = 63.1$ Гц наблю-

дается резонансный пик спектральной плотности флуктуационных колебаний. Вне резонанса сейсмические возмущения слабее возбуждают колебания осциллятора. Это позволяет оценить измеренную чувствительность интерферометрического датчика. На частотах около 60 Гц она не хуже чем $\sqrt{S_{\theta}} \approx 5 \cdot 10^{-11}$ рад/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

Высокочувствительный интерферометрический датчик, описанный в данной работе, разработан для регистрации малых угловых колебаний механических крутильных осцилляторов. Его особенностью является компенсация частотных и амплитудных флуктуаций источника оптического излучения. Датчик создан для исследования шумов поляризации, возникающих в диэлектриках, в частности в плавленом кварце, при помещении их в электростатическое поле. Исследование шумов поляризации важно для проектов создания интерферометрических гравитационно-волновых детекторов Advanced LIGO, в которых юстировка положения кварцевых зеркал осуществляется с помощью электростатических актюаторов [10]. Датчик также может быть использован и в других устройствах, где необходимо измерять малые дифференциальные смещения зеркал.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 11-02-00383, 12-02-31407) и Национального научного фонда США (грант NSF-PHYS-0967049).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rigue J., Chrischon D., De Andrade A.M.H., Carara M.* // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2012. V. 324. Issue 8. P. 1561.
2. *Zemma E., Luzuriaga J.* // J. Low Temp. Phys. 2012. V. 166. Issue 3–4. P. 171.
3. *Syshchenko O., Day J., Beamish J.* // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 104. Issue 19. № 195301.
4. *Schlamminger S., Choi K.-Y., Wagner T.A. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 100. Issue 4. № 041101.
5. *Onofrio R.* // New J. Phys. 2006. V. 8. № 237.
6. *Haiberger L., Jager D., Schiller S.* // Rev. Sci. Instrum. 2005. V. 76. Issue 4. № 045106.
7. *Pollack S.E., Turner M.D., Schlamminger S. et al.* // Phys. Rev. D. 2010. V. 81. Issue 2. № 021101(R).
8. *Marzolf John G., S. J.* // Rev. Sci. Instrum. 1964 V. 35. Issue 9. P. 1212.
9. *Hahtela O., Tittonen I.* // Appl. Phys. B. 2007. V. 88. Issue 3. P. 417.
10. *Harry G.M. (for the LIGO scientific Collaboration)* // Class. Quantum Grav. 2010. V. 22. № 08400.