

УДК 004.85

**А. И. Брицкий**

Институт проблем регистрации информации НАН Украины  
ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина  
тел. (044)-454-2123; e-mail: britsky\_ai@mail.ru

## **Совершенствование геофизических приборов на основе цифровой лазерной интерферометрии**

*Представлены результаты исследований по применению цифровых лазерных интерферометров для повышения точностных характеристик, частотного и динамического диапазонов геофизических приборов: сейсмометров, дельта-гравиметров и наклономеров. Показана целесообразность применения цифровых интерферометров для построения прецизионных калибровочных виброплатформ.*

**Ключевые слова:** цифровой интерферометр, сейсмометр, дельта-гравиметр, наклономер, наноизмерения, виброплатформа.

### **Анализ состояния вопроса и его связь с важными научно-техническими проблемами**

Происходящие землетрясения и техногенные катастрофы предъявляют все более высокие требования к достоверности их прогнозирования. Очевидно, что решение этой задачи связано, в первую очередь, с техническими возможностями соответствующих устройств их прогнозирования.

В настоящее время основными геофизическими приборами являются сейсмометры, дельта-гравиметры и наклонометры. Причем под совершенствованием геофизических приборов понимается увеличение их чувствительности, точности, расширение частотного и динамического диапазонов.

Основой всех геофизических приборов являются чувствительный блок и измерительно-преобразующее устройство. Чувствительный блок представляет собой инерционный объект (маятник или электролит) и вспомогательные устройства, взаимодействие которых измеряется измерительно-преобразующим устройством. Реальные механические узлы геофизических приборов являются достаточно сложными, как, например, показано на рис. 1 [1]. Фактически измерительно-преобразующее устройство измеряет расстояние между инерционной массой и корпусом прибора (или скорость его изменения).

Дальнейший анализ будет посвящен измерительно-преобразующим устройствам, основными из которых являются индукционные и лазерные, причем основное внимание будет уделено лазерным, как наиболее перспективным.

© А. И. Брицкий

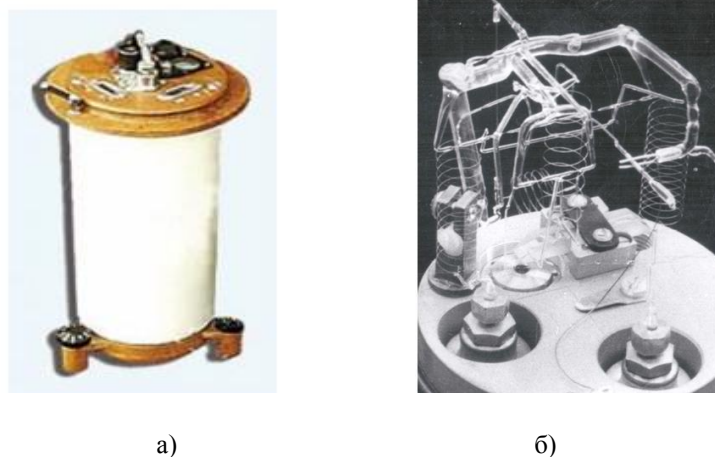


Рис. 1. Дельта-гравиметр ГНУ-КВ (а) и его внутренняя конструкция (б)

В последнее время в научно-технических публикациях появилась информация об использовании лазерных интерферометров в сейсмометрах и дельта-гравиметрах [2, 3], однако в первом случае они используются не в полной мере, а во втором — применяются сложные гетеродинные интерферометры с промежуточным преобразованием сигнала в радиочастотный диапазон с последующей фазовой обработкой. Так, например в [4], при использовании интерферометра авторы предлагают вычислять функцию арктангенса с частотой 100 кГц для определения перемещения на интервале  $0 \dots \lambda/2$  и не раскрывают вопрос устранения неоднозначностей отсчета, в [5] перемещение определяется с точностью  $\lambda/8$ . При этом явно прослеживается следующая особенность — отсутствие использования прямого цифрового измерения перемещения для коррекции динамических свойств геофизических приборов.

Предварительный анализ показал возможность существенного улучшения технических характеристик геофизических приборов при использовании разработанного в Институте проблем регистрации информации (ИПРИ) НАН Украины и запатентованного быстродействующего интерферометра на основе запоминающего устройства [6], который позволяет измерять относительные перемещения в диапазоне расстояний  $0 \dots 700$  мм с разрешающей способностью не хуже  $\lambda/512$ , т.е. 0,6 нм, в зависимости от стабильности среды измерений.

**Целью настоящей статьи является** определение путей совершенствования геофизических приборов на основе цифровой лазерной интерферометрии.

## Применение цифрового лазерного интерферометра в сейсмометрах

**1. Непосредственное применение.** В этом случае один из уголкового отражателей интерферометра закрепляется на инерционной массе (маятнике), а другой — на корпусе сейсмометра. При этом производится непосредственное измерение колебаний Земной поверхности, а не их скорости. Преимущественное количество существующих механических сейсмометров измеряют скорость колебаний Земной поверхности индукционным способом, вследствие чего результаты измере-

ний на сверхнизких частотах зашумлены, а для регистрации колебаний во всем динамическом диапазоне необходимо использовать 24–26-разрядные АЦП. Для сравнения, в предлагаемом подходе используются 9-разрядные АЦП для достижения разрешения до 0,6 нм и соответствующий запатентованный алгоритм устранения неоднозначностей. При единичном увеличении разрядности АЦП разрешающая способность измерения увеличивается в 2 раза. На рис. 2 показан результат применения предложенного подхода, а на рис. 3 — изображение соответствующего мобильного цифрового интерферометрического комплекса измерения колебаний Земной поверхности.

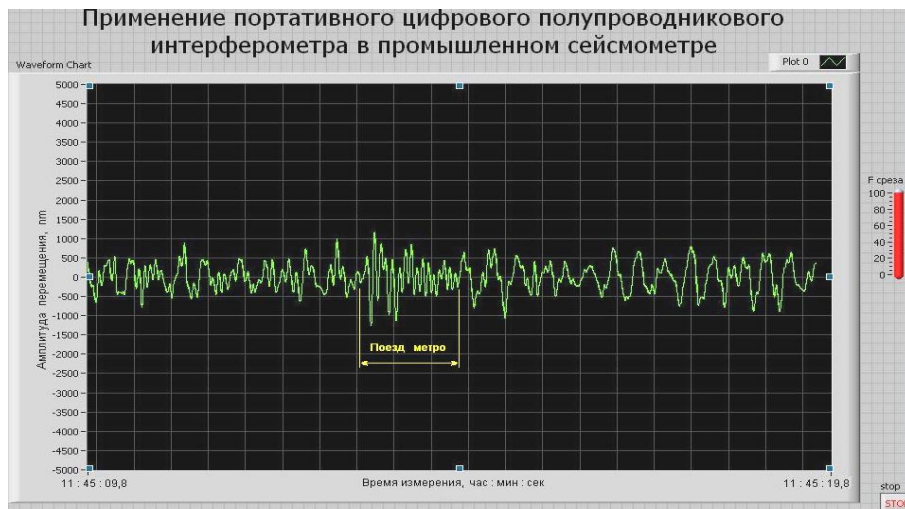


Рис. 2. Пример фиксации колебаний Земной поверхности на территории ИПРИ НАН Украины при прохождении поезда метрополитена

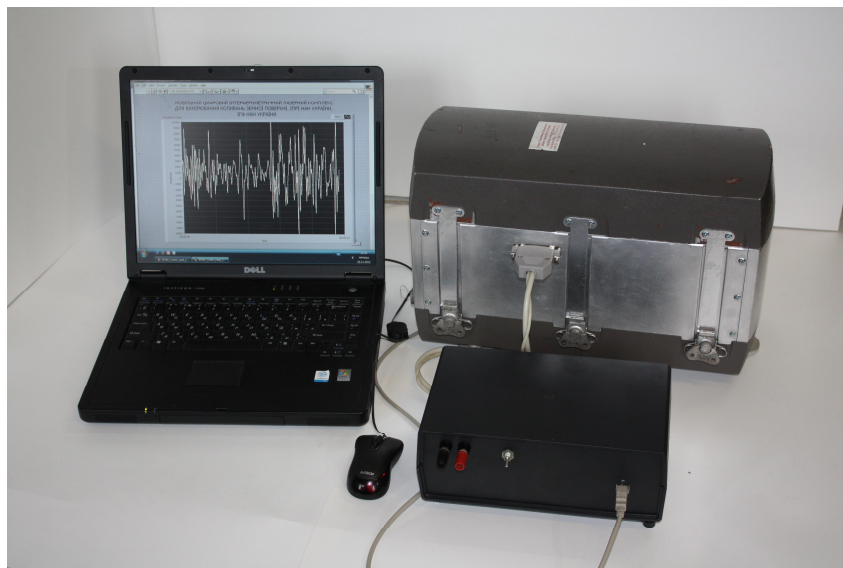


Рис. 3. Мобильный цифровой лазерный интерферометрический комплекс для измерения колебаний Земной поверхности на основе сейсмометра SL-210

**2. Применение цифрового лазерного интерферометра для расширения частотного диапазона сейсмометров в области инфранизких частот.** Известно, что механические ограничения частотных характеристик сейсмометров в области инфранизких частот можно значительно уменьшить путем введения отрицательных обратных связей по скорости. Математическая модель сейсмометра, как измерителя перемещений в области существенных частот, известна и может быть представлена в виде

$$K(s) = -s \frac{\frac{m}{k}s + \frac{\gamma}{k}}{\frac{m}{k}s^2 + \frac{\gamma}{k}s + 1} = \frac{\Delta l(s)}{\Delta h(s)}, \quad (1)$$

где  $\Delta l(s)$ ,  $\Delta h(s)$  — изображения по Лапласу измеренного и истинного колебаний Земной поверхности;  $m$ ,  $k$  — масса маятника и коэффициент жесткости подвески;  $\gamma$  — коэффициент отрицательной обратной связи по скорости.

Примеры соответствующих частотных характеристик сейсмометров при разных значениях  $\gamma$  приведены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, при увеличении уровня отрицательной обратной связи по скорости возможно расширение полосы пропускания сейсмометра в области инфранизких частот в пределах 2-х порядков и более, однако при обычных измерениях в существующих сейсмометрах на частотах ниже 0,1 Гц сигналы скорости практически не наблюдаются. Предлагаемый подход на основе цифрового лазерного интерферометра позволяет измерять скорость колебаний практически с нулевых частот. Даже предлагая использовать лазерный интерферометр в сейсмометре [2], авторы не используют этот подход (рис. 5). Как видно из рис. 5, силовая отрицательная обратная связь по скорости реализована обычным, индукционным путем.

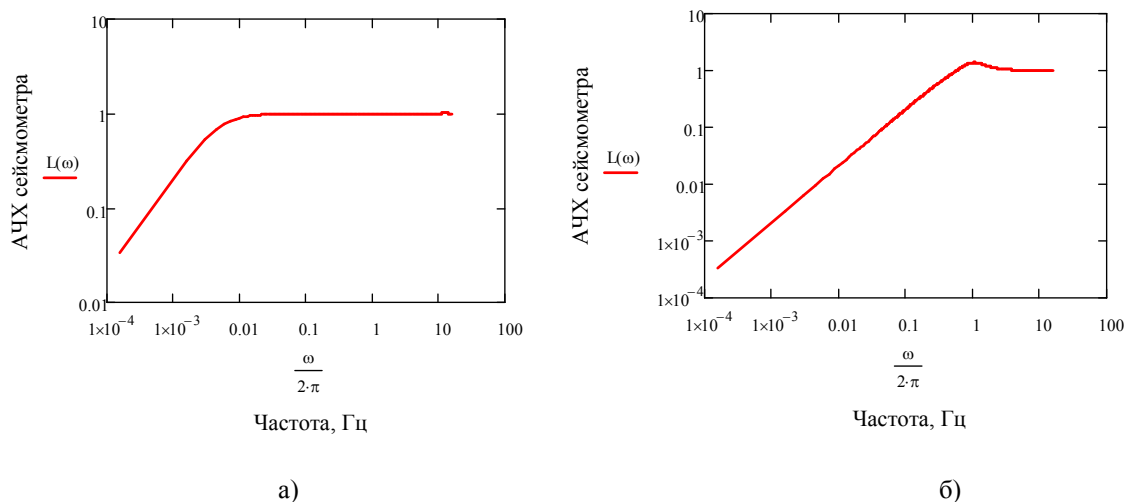


Рис. 4. Примеры АЧХ сейсмометра при различных значениях коэффициента демпфирования по скорости: а)  $\gamma = 10$ ; б)  $\gamma = 1000$

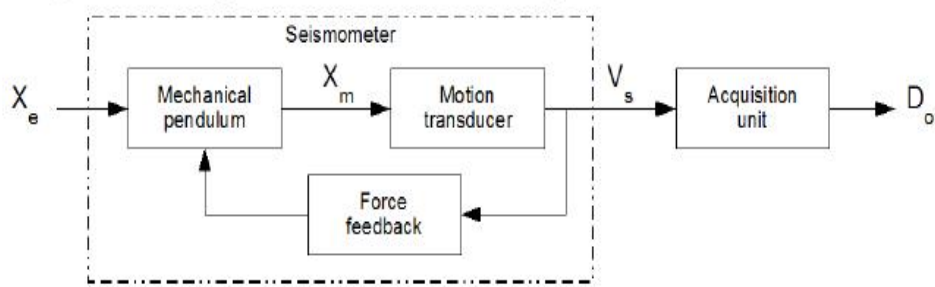


Рис. 5. Сигналы лазерного интерферометра не используются для демпфирования

В настоящее время предлагаемый подход реализован в мобильном цифровом лазерном интерферометрическом комплексе ИПРИ. Эффект лазерного цифрового демпфирования по скорости показан на рис. 6 и 7.

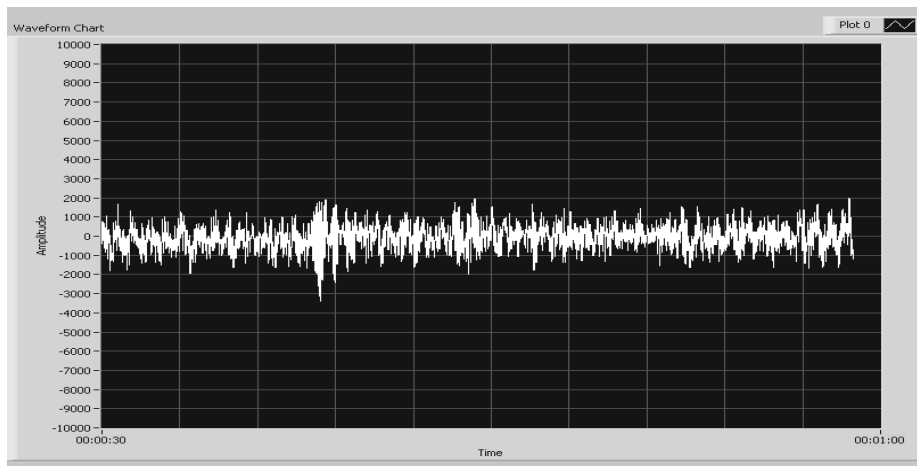


Рис. 6. Сейсмограмма колебаний Земной поверхности при непосредственном использовании цифрового интерферометра

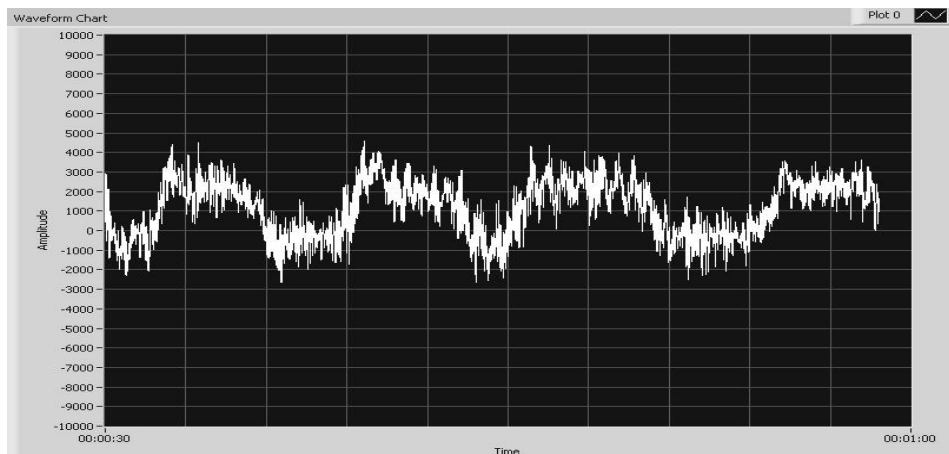


Рис. 7. Результат применения лазерного цифрового демпфирования по скорости. Сейсмометр регистрирует колебания на инфранизких частотах 0,1...0,3 Гц

Реальные возможности такого подхода будут определены после испытаний на измерительном стенде.

**3. Реконструкция колебаний Земной поверхности, измеренных за пределами рабочей области частотной характеристики сейсмометра.** Очевидно, что расширение частотной характеристики сейсмометра в область инфранизких частот не беспредельно. Однако, имея точные цифровые отсчеты колебаний за пределами рабочей области частотной характеристики сейсмометра, можно реконструировать сами колебания путем использования цифровых фильтров.

После дискретизации дифференциального уравнения, полученного из передаточной функции сейсмометра (1), и решения соответствующего разностного уравнения, получим уравнение цифрового фильтра, который восстанавливает колебания Земной поверхности  $h[nT]$  по их измеренным значениям  $l[nT]$ , где  $T$  — период дискретизации:

$$h[nT] = a_1 h[(n-1)T] + a_2 h[(n-2)T] + b_0 l[nT] + b_1 l[(n-1)T] + b_2 l[(n-2)T],$$

где  $a_1 = b_1 = \frac{2m + \gamma T}{m + \gamma T}$ ;  $a_2 = b_2 = -\frac{m}{m + \gamma T}$ ;  $b_0 = -\frac{m + \gamma T + kT^2}{m + \gamma T}$ .

На рис. 8 и 9 приведены результаты моделирования процесса измерения и реконструкции колебания за пределами рабочей области частотной характеристики сейсмометра.

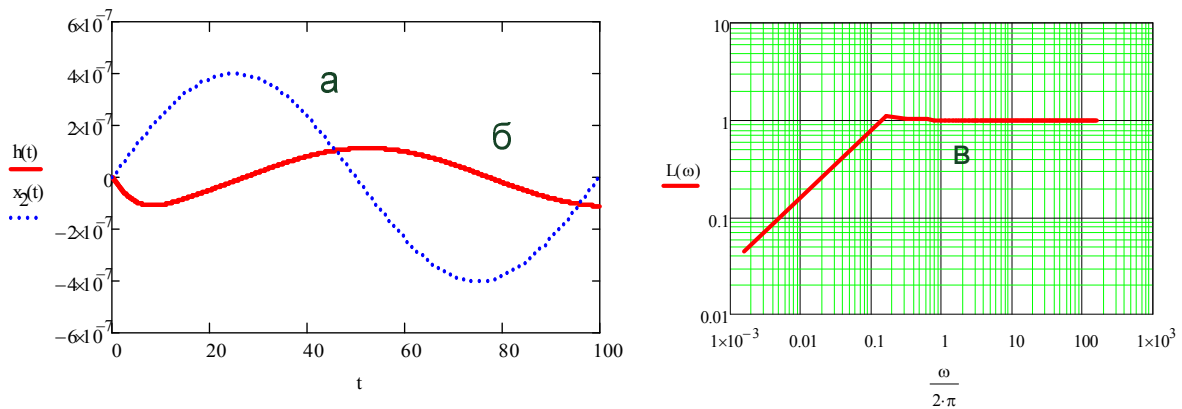


Рис. 8. Колебание с частотой 0,01 Гц (а) и результат его измерения сейсмометром с АЧХ (в)

Из сравнения кривых а) и б) видны значительные отличия результатов измерения и исходного процесса. После применения цифрового фильтра имеем результаты, представленные на рис. 9, откуда видно, что восстановление исходного процесса произошло с точностью не хуже 1 нм.

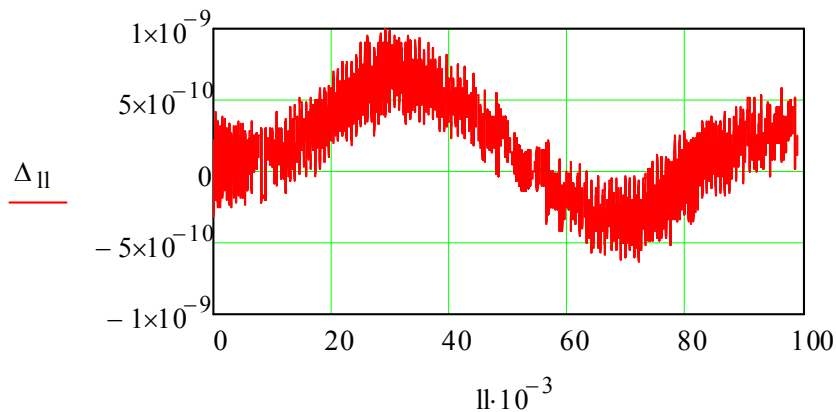


Рис. 9. Ошибки реконструкции колебания цифровым фильтром

**4. Применение цифрового лазерного интерферометра для сертификации геофизических приборов.** Проблема сертификации геофизических приборов в настоящее время стоит очень остро. Это обусловлено отсутствием в Украине прецизионных калибровочных виброплатформ.

В теоретическом плане вопрос не является сложным. Если известно (измерено) входное калибровочное воздействие на геофизический прибор  $x(t)$  и измерена реакция  $y(t)$ , то передаточная функция определяется известным соотношением  $K(s) = L\{y(t)\} / L\{x(t)\}$ , где  $L$  — символ преобразования Лапласа. Классическим путем можно также определить и частотные характеристики. Сложность заключается в измерении входного калибровочного воздействия  $z(t)$  и его формировании (ступенчатое, гармоническое, шумоподобное). При этом должно выполняться условие  $d^2z(t)/dt^2 \leq g$ , при нарушении которого происходит потеря контакта между тестируемым прибором и виброплатформой.

Цифровой лазерный интерферометр предлагается применить для измерения калибровочных колебаний виброплатформы, а сами колебания формировать с помощью пьезопривода.

**5. Применение цифрового лазерного интерферометра в дельта-гравиметрах и наклономерах.** К таким приборам предъявляются чрезвычайно высокие требования по чувствительности, точности и стабильности параметров. По принципу действия в них измеряется нанометрическое перемещение маятников с периодом в десятки и сотни часов. Такие перемещения могут измеряться цифровым лазерным интерферометром. Предварительные исследования стабильности параметров интерферометров показали, что основным условием их успешного применения является стабилизация температуры измерительной системы с точностью до  $0,005$  °C. В настоящее время эта проблема успешно решается и является предметом дальнейших исследований. Пример достигнутых результатов измерения при закрепленных отражателях приведен на рис. 10.

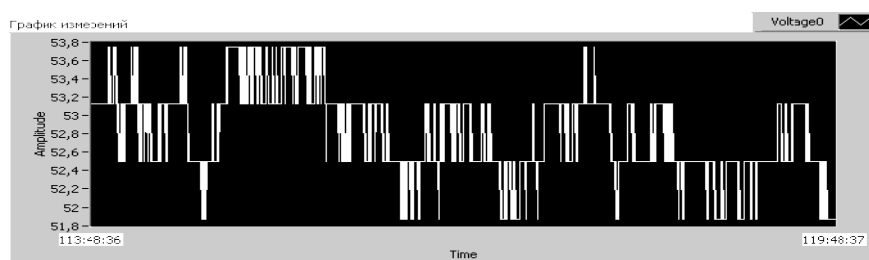


Рис. 10. Разрешающая способность (нм) и стабильность результатов измерений

## Выводы и перспективы дальнейших исследований

Приведенные результаты свидетельствуют о перспективности применения разработанного в ИПРИ НАН Украины цифрового лазерного интерферометра для совершенствования геофизических приборов в следующих направлениях:

- 1) повышение точности измерения, расширение частотного и динамического диапазонов сейсмометров;
- 2) восстановление колебаний Земной поверхности, измеренных за пределами рабочей части частотных характеристик сейсмометров в области инфранизких частот на основе использования цифровых фильтров;
- 3) повышение точности измерения и разрешающей способности дельта-гравиметров и наклономеров;
- 4) создание прецизионных сертификационных виброплатформ для геофизических приборов.

Каждое из этих направлений является направлением отдельных исследований по изучению стабильности параметров соответствующих устройств и влияния параметров среды на результаты измерений.

1. *Гравиметр* наземный кварцевый ГНУ-КВ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://geoget.ru/content/view/142/236/>

2. *Bulk Optics for Seismological Applications* / S. OLIVIER\*, D. PONCEAU, P. MILLIER, N. BREBION. — CEA/DAM/DIF F 91297 ARPAJON FRANCE // *Advances in Optomechanics*; ed. by Alson E. Hatheway // *Proc. of SPIE*. — 2009. — Vol. 7424. — 74240P. — © 2009 SPIE .

3. *Относительный гравиметр на основе лазерного гетеродинного интерферометра с квадратным фазовым модулятором и цифровым методом обработки данных (ГНШ-МА)* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://tehcraft.narod.ru/catalog/gravimetri/>

4. *The Optical Seismometer: A New Technology for Seismographic Observations*. Mark Zumberge, Jonathan Berger [Электронный ресурс] // Presentation to CTBTO S&T 2011 — Режим доступа: [http://www.ctbto.org/fileadmin/user\\_upload/SandT\\_2011/presentations/T3O5%20J\\_Berger%20Optical%20Seismometer.pdf](http://www.ctbto.org/fileadmin/user_upload/SandT_2011/presentations/T3O5%20J_Berger%20Optical%20Seismometer.pdf)

5. *Пат.* 20120247213 А США, МКI G01 V 1/52. Optical Interferometer; заявл. 2.04.2012. опубл. 4.10.2012.

6. *Пат.* на кор. мод. 66878 Україна, МКI G01R 13/00, G01R 15/00. Високошвидкісний інтерферометр на основі запам'ятовуючого пристрою / Петров В.В., Брицкий О.І., Бородин Ю.О., Атаев В.О., Возненко М.В.; заявник та власник Ін-т проблем реєстрації інформації НАН України. — № и 2011 07294, заявл. 09.06.2011, опубл. 25.01.2012, Бюл. № 2.

Поступила в редакцию 26.03.2013