

# Высокоточные акселерометры-гравиметры на основе волоконно-оптических систем

Демьяненко П. А., Зиньковский Ю. Ф.

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”

E-mail: [pdemianenko@gmail.com](mailto:pdemianenko@gmail.com)

Существенным преимуществом волоконно-оптических датчиков (ВОД) перед электрическими является их абсолютная индифферентность к воздействию электромагнитных помех. Однако, измерительным устройствам на основе аналоговых ВОД присущи большие погрешности измерения. Причина в том, что детектирование аналоговой модуляции любого параметра выходного оптического потока сводится к принципиально низкоточным измерениям степени модуляции интенсивности маломощного потока высокоэнергетических фотонов – метрологически низкокачественного потока, которому присущ высокий уровень собственных дробовых шумов. Выход из этой ситуации состоит в отказе от аналоговых и переходе к дискретным принципам модуляции в ВОД параметров оптического потока. При этом в оптический поток вводят новые, дополнительные к оптическим, но *неоптические*, параметры, на которые и переносят роль реципиентов информации. Такой подход сохраняет все преимущества волоконной оптики (носителем информации остается оптический поток), а проблему точности измерений переносит в другие, неоптические области, где она решена должным образом. Рассмотрена возможность построения прецизионных акселерометров (гравиметров) с измерительными преобразователями на основе ВОД нового класса с импульсной модуляцией интенсивности оптического потока (ИВОД). Чувствительным элементом такого ИВОД является конический маятник, на основе консольно закрепленного отрезка кварцевого волоконного световода, на свободном конце которого находится инерционная масса. Высокие значения метрологических параметров измерителя ускорений на основе ИВОД обеспечиваются возможностью прецизионных измерений временных параметров последовательности генерируемых им оптических импульсов. Проведенные расчеты параметров измерителя с реальными значениями параметров его конструкции и частоты генератора счетных импульсов подтвердили возможность получения высоких значений его метрологических характеристик: пороговой чувствительности – до  $10^{-13} g$ , а динамического диапазона значений измеряемых ускорений – до  $10^9$ . Принцип построения конструкции ИВОД позволяет легко изменять в широких пределах его метрологические параметры путем соответствующего подбора как параметров элементов его конструкции, так и частоты генератора счетных импульсов.

*Ключевые слова:* прецизионные акселерометры; гравиметры; импульсные волоконно-оптические датчики

DOI: [10.20535/RADAP.2019.79.33-40](https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.79.33-40)

## Введение

Построение систем управления бытовыми и производственными процессами, вплоть до создания безлюдных технологий, предполагает использование большого количества датчиков разнообразных физических величин. Весьма привлекательными являются волоконно-оптические датчики (ВОД) с их принципиальной индифферентностью к электромагнитным помехам [1].

Однако, как показала практика, измерители на основе аналоговых ВОД не могут конкурировать с электрическими измерителями в вопросах точности измерений [2, 3]. Вместе с тем, достоинства волоконной оптики (ВО), как основы для построения

ВОД, несомненны и побуждают искать выход из создавшегося положения.

## 1 Пути повышения точности измерителей с ВОД

Анализ проблемы точности измерителей на основе ВОД привел к выводу о необходимости отказа от аналогового (непрерывного) принципа модуляции и переходу к дискретным принципам модуляции. Для этого при модуляции оптического потока в него следует вводить дискретные *неоптические* параметры и на них возлагать роль реципиентов информации [4]. Такой подход сохраняет все достоинства ВО, поскольку носителем информации

остаётся оптический поток, а проблему точности измерений переносит из области принципиально низкоточных измерений интенсивности оптического потока в другие, *неоптические*, области, где эта проблема решена надлежащим образом. Неаналоговая модуляция оптического потока может состоять в его пространственно-дискретном распределении или во время-импульсной модуляции его интенсивности. При этом высокая точность измерений будет обеспечиваться возможностью высокоточных измерений пространственных или временных параметров дискретных оптических сигналов.

Примером ВОД первого типа могут служить растровые измерители угловых и линейных перемещений [5]. Их недостатками являются узкий круг измеряемых величин (практически только угловые и линейные перемещения и их производные) и большие габариты оптических модулирующих растров – тем большие, чем более высокую точность измерения они должны обеспечивать.

Лучшие возможности имеют ВОД с выходным сигналом в виде временной последовательности оптических импульсов. Обработка сигналов таких ВОД методами и средствами цифровой техники исключает привнесение ошибок обработки и позволяет корректировать результаты измерений, нейтрализуя влияние на них как естественных недостатков и несовершенств самих ВОД, так и погрешностей их изготовления и юстировки [6]. Это позволяет перенести основное внимание при измерениях от самих ВОД к устройствам обработки их сигналов, что позволяет смягчить требования к тщательности изготовления, сборки и юстировки ВОД, не снижая общего высокого уровня требований к качеству измерений в целом.

Заметим, что для решения ряда актуальных задач науки и практики нужны акселерометры (гравиметры) с пороговой чувствительностью  $< 10^{-11}g$  [7]. При этом у известных измерителей с ВОД, модулирующими интенсивность оптического потока, это значение  $\sim 10^{-6}g$  [8], модулирующими фазу  $\sim 10^{-7}g$  [9], а рекордное значение  $\sim 10^{-9}g$  (не для ВОД) получено в глубокой шахте при усреднении результатов измерений за 100 с [10]. Приведенные примеры – суть лабораторные макеты, которым до реальных измерительных инструментов предстоит пройти непростой путь.

У доступных на рынке промышленных пьезоэлектрических акселерометров фирмы ZETLAB (РФ) пороговая чувствительность  $\sim 10^{-4}g$  [11].

## 2 Прецизионный измеритель ускорений на основе ВОД с импульсной модуляцией интенсивности оптического потока

Возможность реализации прецизионных измерителей с малыми значениями пороговой чувствительности можно показать на примере акселерометра-гравиметра на основе ВОД нового класса с импульсной модуляцией интенсивности оптического потока (ИВОД), устройство которого схематически показано на рис. 1. Его чувствительный элемент – конический маятник, образованный жестко закрепленным отрезком волоконного световода (ВС) 1 с инерционной массой (ИМ) 2 из ферромагнитного материала на его свободном конце. Незатухающее движение маятника поддерживается поочередным силовым действием на ИМ 2 электромагнитов (ЭМ) 4.

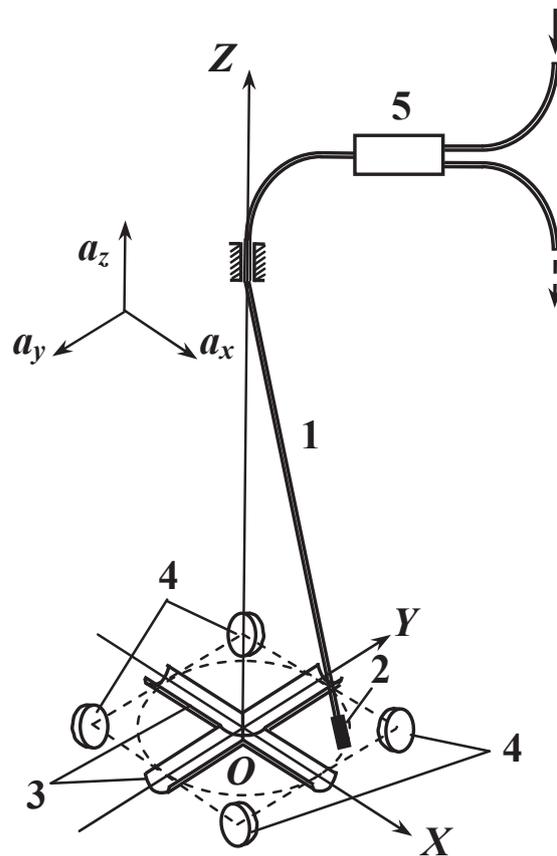


Рис. 1. Схематическое устройство ИВОД ускорения (обозначения на рисунке раскрыты в тексте)

Через входной порт разветвителя 5 в ВС 1 вводится непрерывный световой поток, выходящий из торца ВС наружу. Четырежды за период колебаний маятника пересекает оси расположенных под ним скрещенных цилиндрических зеркал 3, задающих

горизонтальные оси чувствительности акселерометра  $OX$  и  $OY$ . В эти моменты времени световой поток частично отражается зеркалами 3 обратно в ВС 1, формируя в выходном порту разветвителя 5 последовательность коротких оптических импульсов.

В отсутствие ускорения круг обращения маятника симметричен осям зеркал и временные интервалы между любой парой выходных оптических импульсов одинаковы. Появление ускорения  $\vec{a}_x$  (рис.1) сдвигает круг обращения маятника вдоль оси  $OX$  пропорционально величине этого ускорения. Сдвиг нарушает симметрию времён пребывания маятника по разные стороны оси  $OY$ . Разность этих времён  $\Delta\tau_Y$  может служить мерой ускорения  $\vec{a}_x$ , а знак этой разности определяет направление вектора  $\vec{a}_x$ . Все сказанное в полной мере относится и к ускорению  $\vec{a}_y$ .

Ускорение  $\vec{a}_z$  не сдвигает круга обращения маятника, но изменяет его период. В этом случае за меру величины  $\vec{a}_z$  можно взять разность периодов при отсутствии и наличии этого ускорения:  $\Delta\tau_Z = T_0 - T_Z$ .

Измерение временных интервалов между информационными импульсами осуществляется путем заполнения этих интервалов счетными количествами импульсов стабилизированного генератора высокой частоты.

### 3 Принципы работы ИВОД

Кинематическая схема ИВОД и действующие на ИМ силы, показаны на рис. 2, где:  $\vec{\Phi} = -m\vec{a}$  – радиальная сила инерции Д’Аламбера;  $\vec{a} = \vec{\ddot{r}}$  – центростремительное ускорение;  $\vec{F}_{упр} = -A\vec{r}$  – сила упругости консоли ВС;  $A = 3EI/l^3$  – жесткость консоли ВС;  $E$  – модуль Юнга для материала консоли ВС (кварца);  $I = \pi d^4/64$  – полярный момент инерции поперечного сечения консоли ВС;  $l, d$  – длина и диаметр консоли ВС;  $\vec{F}_{вн}$  – внешняя (со стороны ЭМ 4, рис. 1) сила, компенсирующая потери энергии маятником;  $\vec{F}_{сопр}$  – диссипативная сила реакции среды (воздуха) на движение маятника (при малых скоростях движения эта сила пропорциональна скорости:  $\vec{F}_{сопр} = -\mu\vec{v} = -\mu\vec{\dot{r}}$ );  $\mu$  – коэффициент сопротивления среды;  $\vec{r}$  – радиус-вектор движения ИМ. Для получения уравнения движения ИМ воспользуемся уравнениями Лагранжа второго рода.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = 0,$$

где:  $L = (T - \Pi)$  – лагранжиан системы, представляющий собой разность между ее кинетической ( $T$ ) и потенциальной ( $\Pi$ ) энергиями;  $q_j$  – обобщенная координата маятниковой ( $j = 1, 2, \dots$ );  $\dot{q}_j$  – временная производная обобщенной системы координат.

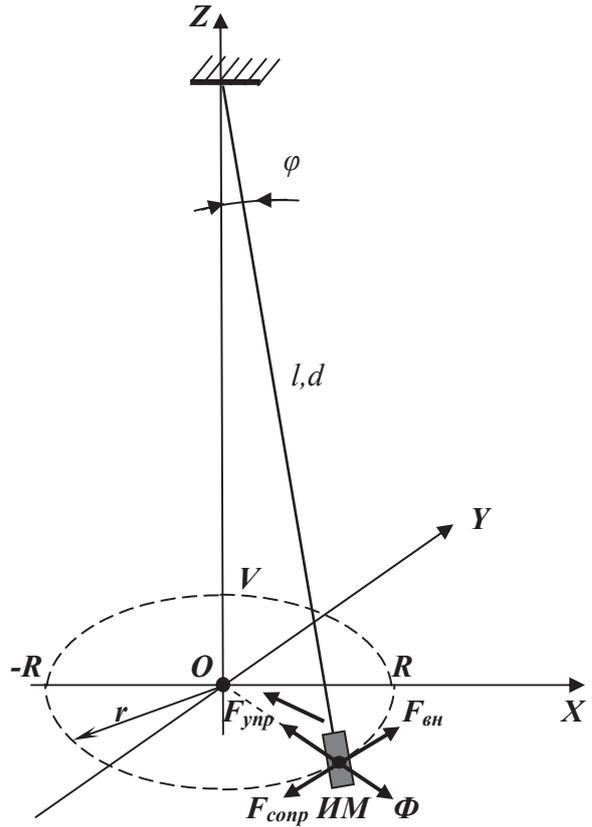


Рис. 2. Кинематическая схема ИВОД (обозначения на рисунке раскрыты в тексте)

Поскольку в рассматриваемой системе наряду с потенциальными действуют и непотенциальные силы (та же  $\vec{F}_{сопр}$ ), то уравнения Лагранжа в этом случае записываются в виде:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = -\frac{\partial \Pi}{\partial q_j} + Q_j, \quad (1)$$

где  $-\frac{\partial \Pi}{\partial q_j}$  – обобщенные потенциальные силы системы;  $Q_j$  – обобщенные непотенциальные силы системы.

В исследуемой маятниковой системе нас интересует движение ИМ, которое можно рассматривать как имеющее только одну степень свободы – радиус-вектор обращения ИМ –  $\vec{r}$ . Его и примем в качестве обобщенной координаты:  $q_j = r$ . Тогда система уравнений (1) сводится к одному уравнению:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{r}} \right) - \frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{\partial \Pi}{\partial r} + Q, \quad (2)$$

где  $\Pi = \frac{Ar^2}{2}$  – потенциальная энергия упругой консоли ВС, конец которой смещен от положения равновесия на величину  $r$ .

Определим вид входящих в уравнение (2) выражений, применительно к рассматриваемому случаю:

$$\begin{aligned} T &= \frac{m\nu^2}{2} = \frac{m(\dot{r})^2}{2}; \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{r}} &= \frac{m}{2} \cdot 2\dot{r} = m\dot{r}; \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{r}} \right) &= \frac{d}{dt}(m\dot{r}) = m\ddot{r}; \\ \frac{\partial T}{\partial r} &= \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{m(\dot{r})^2}{2} \right) = 0; \\ \frac{\partial \Pi}{\partial r} &= \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{Ar^2}{2} \right) = Ar; \\ Q &= F = -\mu\dot{r}. \end{aligned} \quad (3)$$

С учетом (3) уравнение движения ИМ приобретает вид:

$$m\ddot{r} + \mu\dot{r} + Ar = 0. \quad (4)$$

Диссипативный член  $\mu\dot{r} = -F_{\text{сопр}}$  свидетельствует о затухающем движении маятника. Для обеспечения незатухающего движения маятника силу  $F_{\text{сопр}}$  компенсируют действием на ИМ силы  $F_{\text{вн}}$  со стороны ЭМ 4 (рис. 1). Тогда уравнение (4) приобретает полный вид:

$$m\ddot{r} + \mu\dot{r} + Ar = F_{\text{вн}}. \quad (5)$$

Из сказанного выше, очевидно:

$$\mu\dot{r} = F_{\text{вн}},$$

что позволяет упростить (5):

$$m\ddot{r} + Ar = 0. \quad (6)$$

Запишем (6) в проекциях вектора  $\vec{r}$  на оси чувствительности ИВОД (рис. 1):

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= -Ax \\ m\ddot{y} &= -Ay \end{aligned} \right\} \text{ или } \left. \begin{aligned} \ddot{x} + \omega^2 x &= 0 \\ \ddot{y} + \omega^2 y &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где:  $\omega^2 = A/m$  – собственная круговая частота вращения маятника.

Решение системы (7) в общем случае имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= C_1 \cdot \cos \omega t + C_2 \cdot \sin \omega t \\ y(t) &= C_3 \cdot \cos \omega t + C_4 \cdot \sin \omega t \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Постоянные интегрирования определим приняв такие начальные условия:

$$x(0) = 0; y(0) = R; \dot{x}(0) = V; \dot{y}(0) = 0,$$

здесь:  $V$  – линейная скорость движения ИМ;  $R$  – отклонение ИМ вдоль оси  $OY$  от положения равновесия.

Учитывая начальные условия, из (8) получаем:

$$C_1 = 0; \quad C_2 = V/\omega; \quad C_3 = R; \quad C_4 = 0.$$

С учетом этого (8) приобретет вид:

$$\left. \begin{aligned} x &= \left( \frac{V}{\omega} \right) \cdot \sin \omega t \\ y &= R \cdot \cos \omega t \end{aligned} \right\}.$$

Эта система уравнений является параметрическим заданием траектории движения ИМ. Исключая параметр  $t$ , получим уравнение эллипса:

$$\frac{x^2}{\left( \frac{V}{\omega} \right)^2} + \frac{y^2}{R^2} = 1.$$

В установившемся режиме движение ИМ будет круговым с радиусом  $R_0$  и скоростью  $V_0$ :

$$R_0 = \frac{V_0}{\omega} = V_0 \sqrt{\frac{ml^3}{3EI}},$$

отсюда период свободного обращения маятника:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{ml^3}{3EI}}. \quad (9)$$

При силовых воздействиях на ИВОД измеряя период обращения маятника и времена его пребывания по разные стороны осей зеркал, можно определить ускорение, приобретаемое объектом-носителем ИВОД.

## 4 Метрологические возможности измерителя ускорения на основе ИВОД

Рассмотрим реакцию ИВОД при действии на него горизонтального и вертикального ускорений. Пусть в первом случае вектор ускорения параллелен оси  $OX$  (рис. 1), а во втором –  $OZ$ .

Пороговая величина горизонтального ускорения  $(\vec{a}_{\text{пор}})_x$  сместит круг обращения маятника на величину  $\Delta x_{\text{пор}}$ , при которой сила упругости консоли уравновесит Д'Аламберову силу инерции:

$$m(a_{\text{пор}})_x = A \cdot \Delta x_{\text{пор}}. \quad (10)$$

Определим вначале время прохождения маятником отрезка дуги  $\Delta x_{\text{пор}}$ :

$$\Delta t_{\text{пор}} \approx \frac{T_0}{2\pi} \cdot \frac{\Delta x_{\text{пор}}}{R_0}. \quad (11)$$

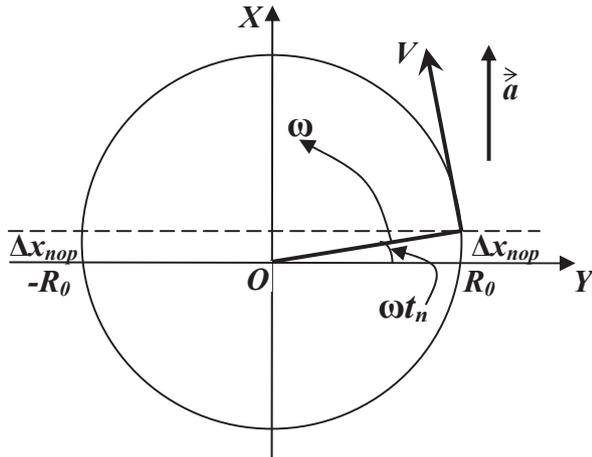


Рис. 3. К выводу условия регистрации  $(a_{пор})_x$ . Обозначения на рисунке раскрыты в тексте

Пользуясь рис. 3, запишем условие регистрации  $(a_{пор})_x$  :

$$\Delta\tau_{пор} = 4\Delta t_{пор} = T_{ген} = 1/f_{ген}; \quad (12)$$

здесь:  $\Delta\tau_{пор}$  – разность времён пребывания маятника по разные стороны оси  $OY$  (рис. 1);  $T_{ген}$  и  $f_{ген}$  – период и частота генератора счетных импульсов, которыми заполняют интервалы между оптическими импульсами.

Из выражений (9) – (12) получим:

$$(a_{пор})_x = \frac{R_0}{4f_{ген}} \left( \frac{3EI}{ml^3} \right)^{\frac{3}{2}} = 2\pi^3 \frac{R_0}{f_{ген} T_0^3}. \quad (13)$$

Максимальная величина ускорения вдоль оси  $OX$ , которая может быть измерена с помощью данного ИВОД, и динамический диапазон ускорений определяются соотношениями:

$$(a_{max})_x = \frac{3EI}{ml^3} R_0 = \frac{4\pi^2}{T_0^2} R_0, \quad (14)$$

$$N_x = \frac{(a_{max})_x}{(a_{пор})_x} = \frac{2}{\pi} f_{ген} \cdot T_0. \quad (15)$$

Очевидно, полученные результаты для оси  $OX$  в полной мере могут быть отнесены и к оси  $OY$ . Если вектор горизонтального ускорения ориентирован произвольно в плоскости  $XOY$ , его величина определится как геометрическая сумма его проекций, полученных в каналах «X» и «Y»:

$$a_{гор} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}.$$

Быстродействие акселерометра в отсутствие вертикальной составляющей вектора ускорения определяется периодом обращения маятника  $T_0$  (9).

Следующий случай – вектор ускорения параллелен оси  $OZ$  – принципиально отличается от

рассмотренных, поскольку информационным параметром здесь выступает сама длительность периода обращения маятника, измеряемая в третьем, «Z»-канале, акселерометра. Выражение, определяющее период обращения маятника в этом случае имеет вид:

$$T = 2\pi \cdot \left( \frac{3EI}{ml^3} \mp \frac{a_Z}{l} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

Знак "минус" в скобках соответствует случаю совпадения направления вектора ускорения с положительным направлением оси  $OZ$ .

Условие регистрации порогового ускорения вдоль оси  $OZ$ , определится равенством разности периодов обращения маятника согласно (9) и (16) длительности одного периода генератора счетных импульсов:

$$T_{ген} = \frac{1}{f_{ген}} = 2\pi \left[ \left( \frac{3EI}{ml^3} \right)^{-\frac{1}{2}} - \left( \frac{3EI}{ml^3} \mp \frac{(a_{пор})_Z}{l} \right)^{-\frac{1}{2}} \right].$$

Из этого выражения, принимая во внимание, что  $\frac{(a_{пор})_Z}{l} \ll \frac{3EI}{ml^3}$ , получим:

$$(a_{пор})_Z \approx \frac{l}{\pi f_{ген}} \cdot \left( \frac{3EI}{ml^3} \right)^{\frac{3}{2}} = \frac{8\pi^2 l}{f_{ген} \cdot T_0^3}. \quad (17)$$

На определение максимальной величины ускорения  $(a_{max})_Z$ , которая может быть измеренной, нет четких физических ограничений. Для определенности примем ее величину такой, когда период обращения маятника уменьшается вдвое. Опуская подсчеты, приведем результат:

$$(a_{max})_Z = 9 \cdot \frac{EI}{ml^2} = \frac{12\pi^2 l}{T_0^2}. \quad (18)$$

Динамический диапазон ускорений, измеряемых вдоль оси  $OZ$ , определится выражением:

$$N_Z = \frac{(a_{max})_Z}{(a_{пор})_Z} = \pi f_{ген} \sqrt{\frac{3ml^3}{EI}} = \frac{3\pi}{2} f_{ген} \cdot T_0. \quad (19)$$

Как видно из полученных выражений, основные метрологические параметры акселерометра можно легко изменять в широких пределах соответствующим выбором параметров элементов конструкции ИВОД и частоты генератора счетных импульсов. Заметим, что входящие в эти выражения временные интервалы могут быть измерены с надлежащей точностью.

Проиллюстрируем сказанное двумя примерами. Так, используя для подвеса маятника стандартный ВС типа "кварц-кварц" с наружным (по кварцу) диаметром 125 мкм (для него  $E = 7 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ ;  $I = 1,2 \cdot 10^{-17} \text{ м}^4$ ), длиной  $l = 1 \text{ см}$  и инерционной массой  $m = 0,1 \text{ г}$ , при  $R_0 = 2 \text{ мм}$  и  $f_{ген} = 5 \cdot 10^7 \text{ Гц}$ , из выражений (9 – 15), (17 – 19), получим:

$$\begin{aligned}
 (a_{\text{пор}})_{x,y} &= 4 \cdot 10^{-6} g; \\
 (a_{\text{max}})_{x,y} &= 5 g; \\
 N_{x,y} &= 1, 2 \cdot 10^{-6}; \\
 (a_{\text{пор}})_z &= 2 \cdot 10^{-5} g; \\
 (a_{\text{max}})_z &= 75 g; \\
 N_z &= 3, 5 \cdot 10^{-6}; \\
 T_0 &= 4 \cdot 10^{-2} c.
 \end{aligned}$$

А приняв  $l = 10$  см и  $m = 10$  г (при неизменных других значениях):

$$\begin{aligned}
 (a_{\text{пор}})_{x,y} &= 1, 2 \cdot 10^{-13} g; \\
 (a_{\text{max}})_{x,y} &= 5 \cdot 10^{-5} g; \\
 N_{x,y} &= 4 \cdot 10^8; \\
 (a_{\text{пор}})_z &= 8 \cdot 10^{-12} g; \\
 (a_{\text{max}})_z &= 7, 5 \cdot 10^{-3} g; \\
 N_z &= 9 \cdot 10^8; \\
 T_0 &= 12, 5 c.
 \end{aligned}$$

Расчеты показывают заметную разницу чувствительностей акселерометра вдоль горизонтальных и вертикальной осей. Причиной этого является присущее конструкции ИВОД различие принципов преобразования сил инерции, действующих вдоль этих осей, в информативные временные разности и  $\Delta\tau_{Y(X)}$  и  $\Delta\tau_Z$ . Различие чувствительностей выравнивается в устройстве обработки измерителя введением в его «горизонтальные» и «вертикальные» каналы соответствующих масштабных коэффициентов.

## Заключение

Проведенные оценочные расчеты подтверждают возможность построения на основе ИВОД прецизионных измерителей линейных ускорений с высокими значениями пороговой чувствительности и широким динамическим диапазоном.

На основе таких измерителей возможно построение градиентометров реальных размеров (с базой в единицы метров) для исследования неоднородностей гравитационных полей Земли или других планет непосредственно с орбит их искусственных спутников.

Рассмотренный в качестве примера 3-х координатный акселерометр может служить основой создания бесплатформенных инерциальных систем навигации, в частности, для межпланетных космических аппаратов (КА).

Такие системы позволят осуществлять:

- непосредственный контроль изменений параметров орбит или траекторий полета КА,

вызываемых сверхмалыми внешними силовыми факторами (тормозное действие остатков атмосфер планет, давление «солнечного ветра» и т.п.), действующих на протяжении всего времени полета;

- контролируемую коррекцию параметров орбит (траекторий) КА путем включения мало-мощных бортовых двигателей или разворачивания «солнечных парусов»;
- исследование влияния контролируемых уровней микрогравитации на характер протекания различных физико-химических и биологических процессов.

Рассмотренный измеритель может быть использован как высокочувствительный гравиметр для проведения ряда геофизических исследований: экспериментальная проверка стабильности положения центра масс Земли; мониторинг смещения полюсов Земли; измерение гравитационной постоянной.

Важным применением таких измерителей может быть мониторинг сейсмической ситуации в застроенных районах городов с подземным метрополитеном.

К сожалению, естественный сейсмический шумовой фон Земли не позволяет провести экспериментальную проверку возможности измерения столь высоких пороговых значений ускорений. Такую проверку в принципе можно провести на борту КА, пребывающего в состоянии свободного полета.

## Перечень ссылок

1. Волоконно-оптические датчики / Т. Окопи, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Кюма, К. Хататэ ; под ред. Т. Окопи. - Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отдние, 1990. - 256 с.
2. Жижин В. Волоконно-оптические датчики: перспективы промышленного применения // Электронные компоненты. - 2010. - №12. - с. 17-23.
3. Гуляев Ю.В. Волоконно-оптические технологии, устройства, датчики и системы / Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, В.Т. Потапов, Ю.К. Чаморовский // Фотон-Экспресс. - 2005. - Т. 46, № 6. - с. 114-127.
4. Демьяненко П.А. Повышение точности измерений в волоконно-оптических системах измерения с оптическими датчиками / П.А. Демьяненко // Радиотехника. - 1991. - №2. - с.83-85.
5. Карман А. Точность как в аптеке / А. Карман, А. Келин, А. Кожемяка // Мир автоматизации. Компоненты. Технологии. Решения. - 1995. - вып. 29.
6. Демьяненко П.А. Точность измерений посредством волоконно-оптических датчиков (проблемы и пути их решения) / П.А. Демьяненко // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника, 1995, вып. 29, с.88-93.
7. Буланже Ю.Д. О стабильности гравитационного поля Земли / Ю.Д. Буланже, Ю.Е. Нестерихин, Н.П. Парийский // УФН - 1983. - Т. 139, №2. - с. 364-365.

8. Soref R. Tilting-mirror Fiber Optic Accelerometer / R. Soref, D. H. McMahon // *Appl. Opt.* – 1984. – Vol. 23. – pp. 486-491.
9. Spillman W. D. Multimode Fiber Optic Accelerometer Based on the Photoelastic Effect / W. D. Spillman // *Appl. Opt.* – 1982. – Vol. 21. – pp. 2653-2658.
10. Фара Т. Транспортируемый гравиметр на холодных атомах разработки LNE-SYRTE: работа в подземных условиях в режиме наилучшей чувствительности / Т. Фара, К. Герлен, А. Ландражен и др. // *Гироскопия и навигация.* – 2014. – Т. 86, №3. – С. 3-14.
11. Технические характеристики вибропреобразователей и акселерометров ZETLAB. Режим доступа: <http://zet.nt-rt.ru/images/manuals/Vibropreobr.pdf>

## References

- [1] Okosi T. ed., Okamoto K., Otsu M., Nisikhara Kh., Kyuma K. and Khatate K. (1990) *Volokonno-opticheskie datchiki* [Fiber Optic Sensors]. Leningrad, Energoatomizdat, 256 p.
- [2] Zhizhin V. (2010) *Volokonno-opticheskie datchiki: perspektivy promyshlennogo primeneniya* [Fiber Optic Sensors: Prospects for Industrial Applications], *Elektronnye komponenty*, No. 12, pp. 17-23.
- [3] Gulyaev Yu. V., Nikitov S. A., Potapov V. T. and Chamorovskii Yu. K. (2005) *Volokonno-opticheskie tekhnologii, ustroystva, datchiki i sistemy* [Fiber optic technology, devices, sensors and systems], *Foton-Ekspress*, Vol. 46, No. 6, pp. 114-127.
- [4] Demianenko P.A. (1991) *Povyshenie tochnosti izmerenij v volokonno-opticheskikh systemah izmereniya s opticheskimi datchikami* [Improving the accuracy of measurements in fiber-optic measurement systems with optical sensors], *Radiotekhnika*, No. 2, pp. 83-85.
- [5] Karman A., Kelin A. and Kozhemiaka A. (1995) *Tochnost kak v apteke* [Accuracy as in a pharmacy], *Komponenty. Tekhnologii. Resheniya*, No. 29.
- [6] Demianenko P. A. (1995) *Tochnost' izmerenii posredstvom volokonno-opticheskikh datchikov (problemi i puti ikh resheniya)* [Measurement precision of fiber-optic sensors (Problems and Solutions)]. *Optoelektronika i poluprovodnikovaya tekhnika*, Iss. 29, pp. 88-93.
- [7] Bulanzhe Y.D., Nesterikhin Y.E. and Pariiskii N.P. (1983) On the stability of the Earth's gravitational field. *Soviet Physics Uspekhi*, Vol. 26, Iss. 2, pp. 187-188. DOI: 10.1070/pu1983v026n02abeh004341
- [8] Soref R.A. and McMahon D.H. (1984) Tilting-mirror fiber-optic accelerometer. *Applied Optics*, Vol. 23, Iss. 3, pp. 486. DOI: 10.1364/ao.23.000486
- [9] Spillman W.B. (1982) Multimode fiber-optic accelerometer based on the photoelastic effect. *Applied Optics*, Vol. 21, Iss. 15, pp. 2653. DOI: 10.1364/ao.21.002653
- [10] Farah T., Guerlin C., Landragin A., Bouyer Ph., Gaffet S., Pereira Dos Santos F. and Merlet S. (2014) Underground Operation at Best Sensitivity Of The Mobile Lne-Syrte Cold Atom Gravimeter. *Гироскопия и навигация*, Vol. 86, No 3, pp. 3-14.(in Russian)
- [11] ZETLAB *Technical characteristics of vibration transducers and accelerometers*. Available at: <http://zet.nt-rt.ru/images/manuals/Vibropreobr.pdf>

## Високоточні акселерометри-гравіметри на основі волоконно-оптичних систем

Дем'яненко П. О., Зінковський Ю. Ф.

Суттєвою перевагою волоконно-оптичних давачів (ВОД) перед електричними є їх абсолютна індиферентність до дії електромагнітних завад. Однак, вимірювальним пристроям на основі аналогових ВОД притаманні великі похибки вимірювання. Обумовлюється це тим, що детектування аналогової модуляції будь-якого параметра вихідного оптичного потоку зводиться до принципово низькоточних вимірювань ступеню модуляції інтенсивності малопотужного потоку високоенергетичних фотонів – метрологічно низькоякісного потоку, якому притаманний високий рівень власних дробових шумів.

Вихід з цієї ситуації полягає у відмові від аналогових і переході до дискретних принципів модуляції в ВОД параметрів оптичного потоку. При цьому в оптичний потік необхідно вводити нові, додаткові до оптичних, але *неоптичні*, параметри, на які і перекласти роль реципієнтів інформації. Такий підхід зберігає всі переваги волоконної оптики (носієм інформації залишається оптичний потік), а проблему точності вимірювань переносить в інші, *неоптичні* області, де вона розв'язана належним чином.

Розглянута можливість побудови прецизійних акселерометрів (гравіметрів) з вимірювальними перетворювачами на основі ВОД нового класу з імпульсною модуляцією інтенсивності оптичного потоку (ІВОД). Чутливим елементом такого ІВОД є конічний маятник, на основі консольно закріпленого відрізка кварцового волоконного світловоду, на вільному кінці якого знаходиться інерційна маса.

Високі значення метрологічних параметрів вимірювача прискорень на основі ІВОД забезпечуються можливістю прецизійних вимірювань часових параметрів послідовності генерованих ним оптичних імпульсів. Проведені розрахунки параметрів вимірювача з реальними значеннями параметрів його конструкції та частоти генератора підрахункових імпульсів підтвердили можливість отримання високих значень його метрологічних характеристик: порогової чутливості – до  $10^{-13}g$ , а динамічного діапазона значень вимірюваних прискорень – до  $10^9$ .

Принцип побудови конструкції ІВОД дозволяє легко змінювати в широких межах його метрологічні параметри шляхом відповідного добору як параметрів елементів його конструкції, так і частоти генератора підрахункових імпульсів.

*Ключові слова:* прецизійні акселерометри; гравіметри; імпульсні волоконно-оптичні давачі

## High-precision accelerometers-gravimeters based on fiber-optic systems

Demjanenko P. O., Zinkovsky Yu. F.

A significant advantage of fiber-optic sensors (FOS) over electrical sensors is their absolute indifference to the effects of electromagnetic interference. However, the high noise level of the low-intensity flux of high-energy photons in the measuring paths of analog FOS limits the accuracy of measuring devices based on them. The fact is that the analog modulation of any parameter in a FOS ultimately leads to fundamentally low-precision measurements of the degree of modulation of the intensity of the optical flux.

The way out of this situation is the rejection of the analog and the transition to discrete modulation principles in the FOS of the optical flow parameters. To this end, in the modulation process, new parameters, additional to optical but not optical, are introduced into the optical flow, which will play the role of information carriers. This approach retains all the advantages of fiber optics (the optical stream remains the carrier of information), and transfers the problem of measurement accuracy to other, non-optical areas where it is properly solved.

The possibility of constructing precision accelerometers (gravimeters) with measuring transducers based on new-class FOS with pulse modulation of the optical flux intensity (IFOS) is considered. The sensitive element of such an IFOS is a conical pendulum, on the basis of a cantilever-mounted piece of quartz optical fiber, on the free end of which there is an inertial mass.

High values of the metrological parameters of the accelerometer based on the IFOS are ensured by the possibility of precise measurements of the temporal parameters of the sequence of optical pulses generated by it.

The processing of signals from the IFOS is carried out by methods and means of digital technics, which eliminates the possibility of introducing a signal processing error and allows purposefully correct the measurement results. Thanks to this, it is possible to neutralize the influence on the measurement results of both the natural flaws and imperfections of the IVOD, as well as the errors of their manufacture and adjustment.

The study of the mathematical model of IFOS with real values of its design parameters and the frequency of the generator of counting pulses confirmed the possibility of obtaining high values of its metrological characteristics: the threshold sensitivity is up to  $10^{-13}g$ , and the dynamic range of the measured accelerations is up to  $10^9$ .

These figures should be considered as illustrative. The principle of construction of the IFOS design makes it possible to easily change its metrological parameters over a wide range by a corresponding change in both the parameters of the elements of its construction and the frequency of the counting pulse generator.

*Key words:* precision accelerometers; gravimeters; pulse fiber-optic sensors