

Оптический журнал

Оптическое приборостроение

DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-05-62-71

УДК 53.06

Характеристики макета горизонтального сейсмометра с оптическим дифракционным датчиком колебаний

Владислав Антонович Комоцкий¹✉, Никита Владимирович Суэтин²

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

¹vkomotskii@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-0997-8182>

²2ponata911@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-6602-3606>

Аннотация

Предмет исследования. Макет горизонтального сейсмометра, в состав которого входят физический маятник и оптический дифракционный датчик угловых колебаний, который включает лазер, блок из двух рельефных фазовых дифракционных решеток, диафрагму, выделяющую излучение первого порядка дифракции после блока дифракционных решеток, и фотодетектор. Физический маятник включает диск, закрепленный на оси вращения, возвратные пружины и дополнительный грузик на краю диска. Блок дифракционных решеток размещен на диске. Сигнал с выхода фотодетектора пропорционален малым линейным отклонениям дополнительного грузика под действием сил инерции при горизонтальных колебаниях основания сейсмометра. **Параметры макета.** Диаметр диска 250 мм, масса 2 кг, период свободных колебаний маятника 3 с. Масса дополнительного грузика 0,1 кг. Мощность лазера 5 мВт. Две рельефные фазовые дифракционные решетки с глубиной канавок 0,32 мкм и периодом 0,1 мм расположены на противоположных гранях стеклянного блока дифракционных решеток толщиной 13 мм. Штрихи первой дифракционной решетки параллельны штрихам второй дифракционной решетки. На выходе включены: фотодиод ФД-24к, резистор нагрузки, усилитель и фильтр с полосой пропускания 1800 Гц. **Результаты испытаний.** Макет оптического дифракционного сейсмометра и контрольный сейсмометр СМ-3 установлены на одной платформе. В первой группе экспериментов осуществлялись периодические колебания платформы с периодом 0,475 с. Зависимости сигналов с выходов сейсмометров двух типов были подобными, но при этом наблюдался фазовый сдвиг 90° сигнала с выхода исследуемого макета относительно сигнала с выхода СМ-3, поскольку сигнал с выхода датчика оптического дифракционного сейсмометра пропорционален угловому смещению физического маятника, а сигнал с выхода катушки датчика СМ-3 пропорционален скорости движения маятника. При проведении второй группы экспериментов применялось слабое медленное линейное воздействие на платформу с сейсмометрами. При этом сигнал с выхода СМ-3 не превышал уровня шумов, а сигнал с выхода макета оптического сейсмометра превышал уровень шумов в три раза. Показано, что при медленных возмущениях чувствительность макета сейсмометра существенно превышает чувствительность сейсмометра СМ-3. **Практическая значимость.** Выходной сигнал оптического дифракционного датчика колебаний пропорционален угловому перемещению маятника, а не скорости его движения, поэтому чувствительность макета сейсмометра не снижается в области низких частот колебаний. На основе данной схемы принципиально возможно сконструировать сейсмометр с отрицательной обратной связью для исследования слабых низкочастотных колебаний поверхности Земли.

Ключевые слова: сейсмометр, оптический дифракционный датчик угловых перемещений, оптические дифракционные решетки

Ссылка для цитирования: Комоцкий В.А., Суэтин Н.В. Характеристики макета горизонтального сейсмометра с оптическим дифракционным датчиком колебаний // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 5. С. 62–71. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-05-62-71

Коды OCIS: 250.0250, 050.1950, 280.3420

ВВЕДЕНИЕ

При геофизических исследованиях и при контроле за крупными сооружениями применяются приборы, предназначенные для измерения амплитуды и формы колебаний поверхности: сейсмометры, акселерометры, наклонометры, деформометры. В этих приборах применяются датчики различных типов: индуктивные, емкостные, растровые, дифференциальные трансформаторы, пьезоэлектрические, оптические интерферометры, а также датчики, построенные с применением оптических волокон [1–4]. Обычный сейсмометр содержит следующие основные элементы конструкции: физический маятник, пружину, демпфер колебаний маятника, датчик движения маятника, который преобразует механические характеристики колебаний маятника в электрические величины, такие как ток, напряжение. Например, в качестве датчика колебаний в серийном сейсмометре типа СМ-З применена катушка индуктивности, связанная с маятником и помещенная в постоянное магнитное поле. При движении маятника с катушкой относительно магнита, установленного на основании прибора, на выходах катушки возникает электродвижущая сила (ЭДС), которая создает ток в нагрузке. В результате на выходе сейсмометра формируется сигнал, пропорциональный скорости движения маятника относительно основания. Так как ЭДС на выводах катушки индуктивности пропорциональна скорости движения катушки относительно постоянного магнитного поля, то амплитуда выходного сигнала будет снижаться при уменьшении частоты колебаний поверхности. В результате чувствительность сейсмометра с индуктивным датчиком резко падает в области низких частот. В предельном случае — при статическом отклонении маятника, мы получим нулевой сигнал на выходе катушки. Для улучшения чувствительности сейсмометров в области низких частот представляет интерес применение таких датчиков движения маятника, у которых выходной сигнал пропорционален отклонению маятника от положения равновесия, а не скорости его движения. К этой группе относятся датчики на основе дифференциальных трансформаторов, емкостные датчики, оптические растровые датчики, а также датчики, построенные с применением дифракционных решеток [5].

В данной работе представлены результаты испытаний макета сейсмометра, в котором для регистрации колебаний маятника применен оптический дифракционный датчик, в состав которого входят лазер, блок из двух фазовых дифракционных решеток (блок ДР), расположенных последовательно по ходу лазерного пучка, и фотодиод, установленный в первом порядке дифракции оптического пучка после блока ДР. Электрический сигнал с выхода фотодиода пропорционален малому угловому отклонению блока ДР. При этом блок ДР расположен на оси вращения физического маятника. В результате с выхода фотодиода мы получаем электрический сигнал, пропорциональный угловому отклонению физического маятника, на котором установлен блок ДР. Применение данной схемы позволяет получить высокую чувствительность измерений в области низких частот колебаний.

СХЕМА И ПАРАМЕТРЫ МАКЕТА СЕЙСМОМЕТРА

Схема макета сейсмометра с оптическим дифракционным датчиком колебаний изображена на рис. 1. На основании прибора закреплена втулка с подшипниками, в которых установлена ось вращения. На оси закреплен горизонтальный физический маятник, в состав которого входит диск с дополнительным грузиком и возвратными пружинами. Приводные концы пружин прикреплены к регулировочным механизмам перемещения, которые расположены на стойках, установленных на основании прибора. С помощью этих механизмов можно изменять натяжение пружин при настройке исходного положения маятника и связанного с ним блока ДР в такую исходную позицию, которая соответствует середине линейного участка зависимости выходного сигнала от угла поворота диска. Вблизи от нижней металлической поверхности диска на стойке расположен плоский постоянный магнит, предназначенный для демпфирования колебаний физического маятника. Взаимодействие магнитного поля магнита с металлической поверхностью диска обеспечивает демпфирование колебаний маятника за счет возникновения вихревых токов в металле диска при его движении в магнитном поле.

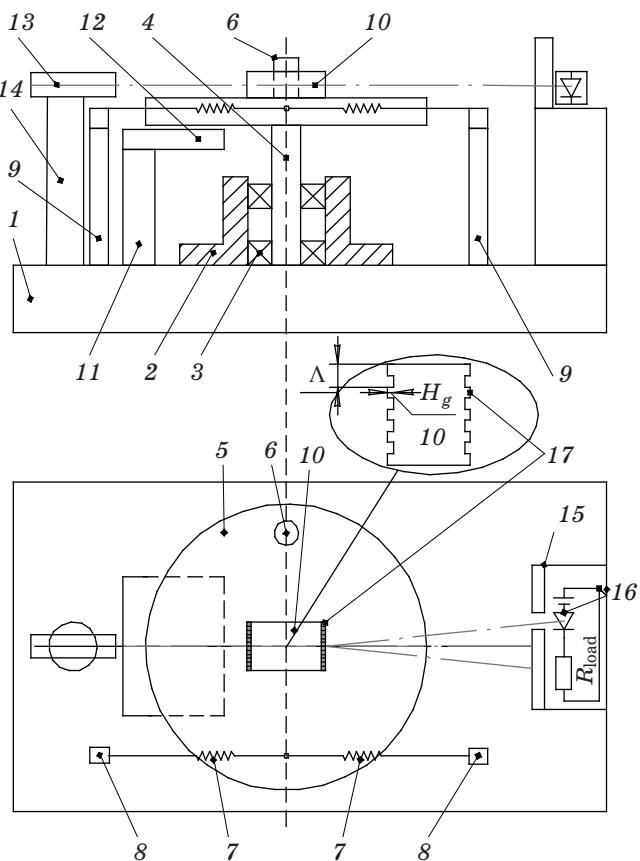


Рис. 1. Схема макета горизонтального сейсмометра с оптическим дифракционным датчиком колебаний. 1 — основание, 2 — втулка, 3 — подшипники, 4 — ось, 5 — диск маятника, 6 — грузик, 7 — возвратные пружины, 8 — регулировочные механизмы, 9 — стойки, 10 — блок дифракционных решеток (блок ДР), 11 — стойка, 12 — магнит, 13 — лазер, 14 — стойка лазера, 15 — диафрагма, 16 — фотодиод, 17 — рельефная дифракционная решетка. На вынесенном поле изображена форма рельефа на блоке ДР. H_g — оптимальная глубина рельефа, R_{load} — сопротивление нагрузки

В состав оптического дифракционного датчика угловых перемещений входят лазер, закрепленный на стойке, дифракционные решетки, объединенные в блок ДР, который расположен на пути лазерного пучка и прикреплен к диску физического маятника над осью его вращения, диафрагма, которая выделяет пучок 1-го порядка дифракции после блока ДР, и фотодиод, расположенный за диафрагмой. С выхода фотодиода мы получаем электрический сигнал, пропорциональный угловому перемещению диска маятника.

Диск маятника имеет диаметр 250 мм и массу 2 кг. Масса дополнительного грузика — 0,1 кг.

Диск состоит из двух слоев: верхний слой изготовлен из пластика (трафлон), а нижний слой, обращенный к демпфирующему магниту, изготовлен из пластины стеклотекстолита, покрытого слоем меди (фольгированный стеклотекстолит). Диск закреплен на свободно вращающейся оси. В качестве узла, содержащего ось вращения, закрепленную в подшипниках, использована вращающаяся головка от видеомагнитофона. Измеренный период собственных угловых колебаний маятника при отсутствии демпфирования составляет 3 с. Для демпфирования колебаний маятника использован плоский поисковый магнит диаметром 60 мм, который располагается вблизи нижней поверхности диска, покрытой слоем меди. Демпфирование колебаний происходит за счет взаимодействия вихревых токов, возникающих в проводящей поверхности диска, с магнитным полем магнита. Степень демпфирования колебаний можно регулировать путем изменения расстояния от магнита до нижней поверхности диска, а также путем перемещения магнита в горизонтальном направлении вдоль радиуса диска, изменяя при этом площадь перекрытия магнита и диска. При недостаточной степени демпфирования колебаний маятника в схему может быть введен второй магнит.

БЛОК ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК

Блок ДР представляет собой прозрачный стеклянный параллелепипед, на противоположных гранях которого расположены рельефные ДР с периодом 0,1 мм. Штрихи двух ДР параллельны друг другу. Рельефные ДР были изготовлены на отдельных стеклянных пластинах с применением фотолитографии и химического травления, а затем эти пластины были приклеены к поверхностям стеклянного блока. Параллельность штрихов двух ДР контролировалась в процессе приклейивания пластин к стеклянному блоку по совмещению дифракционных порядков на картинах дифракции лазерного пучка, прошедшего последовательно через две ДР. В макете сейсмометра пучок излучения лазера последовательно проходил через фазовые дифракционные решетки, расположенные на противоположных гранях блока ДР. Далее, в отличие от схемы,

приведенной в публикациях [6, 12], в данном макете разделение дифракционных порядков происходило за счет углового расхождения пучков дифракционных порядков в пространстве. При этом диафрагма диаметром 1,3 мм располагалась на расстоянии 40 см от блока ДР и выделяла пучок 1-го порядка из дифракционной картины.

При повороте блока ДР относительно оптической оси лазерного пучка происходит смещение дифракционных решеток поперек штрихов ДР в противоположных направлениях по отношению к оптической оси пучка. Это приводит к изменению мощности излучения в 1-ом дифракционном порядке и к пропорциональному изменению выходного тока фотодиода. Ранее в работах [7–10] исследовались зависимости мощности излучения в дифракционных порядках после прохождении светового пучка через систему из двух ДР от смещения поперек штрихов одной ДР относительно другой. Было установлено, что при условии, когда рельефы ДР имеют формы типа «меандр», зависимость мощности излучения в 1-ом (а также в -1-ом) порядке дифракции от смещения одной ДР относительно второй имеет гармонический характер. Рельеф ДР типа «меандр» состоит из чередующихся прямоугольных выступов и впадин (канавок) при условии, что протяженности выступов и впадин одинаковы.

Контроль соответствия формы реальной ДР форме типа «меандр» осуществлялся на этапе изготовления ДР по результатам измерения интенсивностей дифракционных порядков. При этом у ДР типа «меандр» четные дифракционные порядки отсутствуют. Только в случае отсутствия четных порядков в дифракционной картине оптического пучка после ДР можно утверждать, что зависимости мощностей первых дифракционных порядков от перемещения одной из ДР относительно другой ДР будут иметь идеальные синусоидальные формы с периодом Λ , равным периоду ДР, а гармоники с более высокими пространственными частотами с периодами $\Lambda/2$, $\Lambda/3$ и др. — отсутствуют. На практике допустимым критерием качества ДР считалось следующее условие: мощность 2-го порядка дифракции должна составлять не более 0,5% от мощности 1-го порядка дифракции.

Расчетные зависимости, характеризующие блок дифракционных решеток

Профиль фазовой дифракционной решетки, образованной рельефом на поверхности прозрачной пластины, изображен на рис. 2. При прохождении через пластинку с рельефом на ее поверхности оптическая волна получает пространственную фазовую модуляцию (ПФМ) волнового фронта (ВФ), форма которой приведена справа на рис. 2. Функцию модуляции ВФ выразим формулой

$$t(x) = \exp i\Phi(x), \quad (1)$$

где $\Phi(x)$ — функция формы ПФМ ВФ, которая имеет вид

$$\Phi(x) = \begin{cases} \Phi_M & \frac{\Lambda}{2} + k\Lambda > x \geq 0 + k\Lambda \\ -\Phi_M & 0 + k\Lambda > x \geq -\frac{\Lambda}{2} + k\Lambda \end{cases}, \quad (2)$$

$$k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Φ_M — амплитуда ПФМ, она может быть рассчитана как половина разности фаз оптических лучей, проходящих через точки максимальной и минимальной высоты рельефа (луч 1 и луч 2 на рис. 2). При этом разность фаз двух лучей оставляет

$$\Delta\phi = \Phi_2 - \Phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} h(n-1), \quad (3)$$

а амплитуда ПФМ рассчитывается по формуле

$$\Phi_M = \frac{\Delta\phi}{2} = \frac{\pi}{\lambda} h(n-1). \quad (4)$$

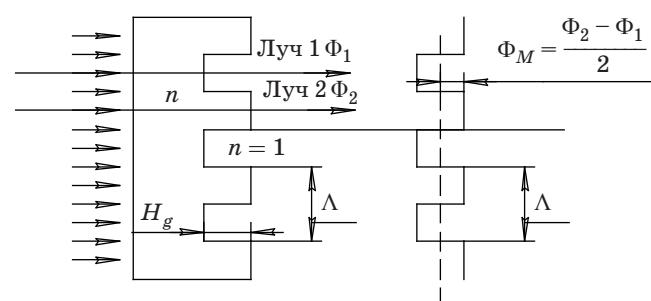


Рис. 2. Схема прохождения оптической волны через рельефную фазовую дифракционную решетку с прямоугольным профилем. Справа изображена функция модуляции ВФ

Представим периодическую функцию (1), (2) бесконечных размеров в виде разложения в ряд Фурье по гармоникам основной пространственной частоты периодической решетки $\xi_1 = \Lambda^{-1}$

$$t(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \dot{a}_m \exp(i2\pi m \xi_1 x). \quad (5)$$

Коэффициенты Фурье выражаются формулами

$$a_0 = \frac{1}{\Lambda} \int_{-\Lambda/2}^{\Lambda/2} t(x) dx = \left(\int_{-\Lambda/2}^0 \exp(-i\Phi_M) dx + \int_0^{\Lambda/2} \exp(i\Phi_M) dx \right) = \cos \Phi_M, \quad (6)$$

$$a_m = \frac{1}{\Lambda} \left(\int_{-\Lambda/2}^0 \exp(-i\Phi_M - im2\pi\xi_1 x) dx + \int_0^{\Lambda/2} \exp(i\Phi_M - im2\pi\xi_1 x) dx \right) = \frac{1}{\pi m} (\sin \Phi_M - \sin(\Phi_M + \pi m)), \quad (7)$$

в частности, выражения для нескольких низших коэффициентов имеют вид

$$a_1 = \frac{2}{\pi} \sin \Phi_M, a_2 = 0, a_3 = \frac{2}{3\pi} \sin \Phi_M, \\ a_4 = 0, a_5 = \frac{2}{5\pi} \sin \Phi_M. \quad (8)$$

Функцию $t(x)$ разложим в пространственный спектр, используя преобразование Фурье. С учетом представления $t(x)$ формулой (5) получим представление пространственного спектра в виде суммы пространственных гармоник, выраженных дельта-функциями,

$$\dot{S}(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} t(x) \exp(-i2\pi\xi x) dx = \\ = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \dot{a}_m \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i2\pi(\xi - m\xi_1)x) dx = \\ = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{a}_m \delta(\xi - m\xi_1). \quad (9)$$

В реальной схеме ДР имеет конечные размеры. Пространственный спектр ДР, имеющей конечные размеры, которые ограничены окном с функцией пропускания $f(x)$, можно получить, применяя операцию свертки спектра (9) с функцией $F(\xi)$, которая является фурье-образом функции $f(x)$. В результате получим

$$\dot{S}(\xi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{a}_m F(\xi - m\xi_1). \quad (10)$$

Отношение мощности пучка излучения в дифракционном порядке с номером m к мощности излучения P_i на входе окна ДР определяется отношением $P_m/P_i = (a_m)^2$ (см. [13]). Таким образом, для ДР, которая имеет прямоугольную форму рельефа типа «меандр», получаем следующие формулы для расчета мощностей в 0-ом и в 1-ом порядках дифракции:

$$P_0 / P_i = (a_0)^2 = \cos^2 \Phi_M, \quad (11)$$

$$P_1 / P_i = (a_1)^2 = (4/\pi^2) \sin^2 \Phi_M. \quad (12)$$

Далее рассмотрим соотношения для схемы, в которой пучок лазерного излучения проходит последовательно через две фазовые ДР с формой профиля типа «меандр». При этом положим, что амплитуды ПФМ двух ДР различны и равны Φ_{M1} и Φ_{M2} .

Коэффициенты Фурье первой ДР —

$$a_0 = \cos \Phi_{M1}, a_1 = \frac{2}{\pi} \sin \Phi_{M1}, \quad (13)$$

коэффициенты Фурье второй ДР —

$$b_0 = \cos \Phi_{M2}, b_1 = \frac{2}{\pi} \sin \Phi_{M2}. \quad (14)$$

Выражения для мощностей излучения в 1-ом и в -1-ом порядках дифракции системы из двух ДР с формой типа «меандр» имеют вид

$$P_{\pm 1} = P_i \left(g_{1c} + g_{1v} \cos \left(\frac{2\pi}{\Lambda} \Delta x \pm L \right) \right), \quad (15)$$

где Δx — смещение одной ДР относительно другой, $L = \pi \lambda d/n\Lambda^2$ — это безразмерный параметр, характеризующий расстояние между ДР,

Λ — период ДР, λ — длина волны излучения лазера, d — расстояние между ДР, n — показатель преломления материала блока ДР, P_i — мощность излучения на входе блока ДР.

В формуле (15) слагаемое $g_{1c} = a_0^2 b_1^2 + a_1^2 b_0^2$ — это постоянная составляющая мощности пучка в 1-ом порядке дифракции, а множитель $g_{1v} = 2a_0 a_1 b_0 b_1$ — это амплитуда переменной составляющей колебаний мощности излучения 1-го порядка при смещении одной ДР относительно другой в направлении поперек штрихов ДР ($0x$). Подставив в формулу для g_{1v} выражения для коэффициентов Фурье a_0, a_1, b_0, b_1 из формул (13) и (14), получим

$$g_{1v} = \frac{2}{\pi^2} \sin(2\Phi_{M1}) \sin(2\Phi_{M2}). \quad (16)$$

Как видно из этой формулы, наибольшее значение коэффициента g_{1v} достигается при значениях $\Phi_{M1} = \Phi_{M2} = 45^\circ$. Это соответствует оптимальной глубине рельефа ДР. Из анализа формулы (16) следует, что небольшие отклонения глубины ДР от оптимальной не приведут к существенному уменьшению g_{1v} . Оценки показывают, что при 10%-ом отклонении параметров Φ_{M1} и Φ_{M2} от оптимальных расчетных значений, равных 45° , что соответствует условию $\sin(2\Phi_{M1}) \sin(2\Phi_{M2}) = 1$, разница между расчетным g_{1v} с учетом отклонений и оптимальным значением составит лишь 2%.

Типичные зависимости нормированных мощностей излучения в 1-ом и в -1-ом порядках дифракции от относительного смещения одной ДР относительно другой ДР представлены на рис. 3. Кривые $I_{\pm 1}(\Delta x)$ имеют строго гармоническую форму с периодом, равным периоду ДР. Так как оптимальная глубина рельефа ДР соответствует условию $\Phi_M = 45^\circ$, то разность фаз лучей, прошедших через выступ и впадину рельефа — $\Delta\Phi = 2\Phi_M = \pi/2$. Учитывая, что разность фаз между лучами, прошедшими через выступ и впадину рельефа равна $\Delta\Phi = (2\pi/\lambda)(n - 1)H_g$, получаем следующую формулу для расчета оптимальной глубины рельефа H_g на поверхности прозрачной подложки: $H_g = \lambda/(4(n - 1))$. Например, если $\lambda = 0,65$ мкм, а $n = 1,51$, то расчетная оптимальная глубина рельефа составит 0,32 мкм. При оптимальной глубине рельефа ДР получается максимальный размах колебаний

мощности в 1-ом, (а также в -1-ом) порядке дифракции, равный $I_{max} = 0,405$. При других значениях глубины рельефа, входящих в состав блока ДР, размах кривых $I_{\pm 1}(\Delta x)$ от пика до пика будет меньше, чем 0,405, а это приведет к некоторому снижению крутизны линейного рабочего участка синусоиды, изображенной на рис. 3. В то же время следует заметить, что отклонение глубины рельефа от оптимального значения не приводит к отклонению формы характеристики, изображенной на рис. 3, от синусоидальной. Поэтому при изготовлении ДР можно допустить некоторое отклонение глубины рельефа ДР от оптимального значения.

Заметим, однако, что, на практике глубина рельефа ДР с помощью профилометра не изменилась, а применялась оптическая методика измерений, изложенная в работе [11]. По этой методике глубина рельефа может быть определена по результатам измерений мощностей излучения в 0-ом и в 1-ом дифракционных порядках после однократного прохождения лазерного пучка через ДР. Оптимальная глубина ДР соответствует следующему соотношению мощностей излучения в 1-ом и в 0-ом порядках дифракции: $P_1/P_0 = 4/\pi^2 = 0,405$, как это видно из формул (11) и (12).

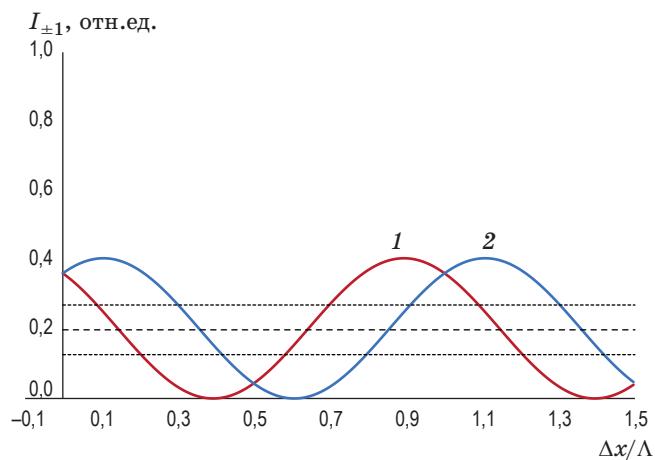


Рис. 3. Зависимости нормированных мощностей излучения $I_{\pm 1}(\Delta x) = P_{\pm 1}(\Delta x)/P_i$ в первых порядках дифракции ($I_{+1}(\Delta x) = 1$, $I_{-1}(\Delta x) = 2$) от относительного смещения $\Delta x/\Lambda$ одной ДР относительно другой поперек штрихов решеток. Для данного графика параметр $L = 0,94$, однако изменение значения параметра L не влияет на формы кривых $I_{\pm 1}(\Delta x)$. При изменении L изменяется лишь сдвиг между кривыми $I_{\pm 1}(\Delta x)$ по оси абсцисс

НАСТРОЙКА И РАБОТА ПРИБОРА

Макет сейсмометра устанавливался на горизонтальной поверхности и ориентировался таким образом, чтобы направление движения дополнительного грузика вдоль оси Oy при малых угловых отклонениях диска совпадало с направлением координаты поверхности платформы, вдоль которой проводится измерение колебаний этой поверхности. Затем проводилась настройка схемы таким образом, чтобы начальная рабочая точка соответствовала середине линейного участка зависимости выходного сигнала от угла поворота диска маятника с прикрепленным к нему блоком ДР. Для этого диск с блоком ДР поворачивался, изменяя натяжение пружин, и измерялось напряжение сигнала на выходе фотодетектора. При этом фиксировались максимальное и минимальное значения выходного напряжения, а затем, изменяя натяжение пружин, устанавливались такое положение диска, при котором напряжение сигнала на выходе фотодетектора равнялось среднему значению между измеренными максимальным и минимальным значениями выходного напряжения. После завершения такой настройки рабочая точка соответствует ее положению в середине одного из линейных участков зависимости $I_1(\Delta x)$.

После настройки устройство работает следующим образом: при горизонтальном движении основания сейсмометра в направлении, перпендикулярном радиусу, проведенному из центра диска к грузику, т.е. при движении поверхности в направлении Oy из-за инерции происходит смещение грузика относительно основания. Это вызывает поворот диска маятника вместе с блоком ДР относительно основания и приводит к изменению угла падения лазерного пучка на блок ДР. В результате изменяется мощность 1-го порядка дифракции лазерного пучка на выходе из блока ДР. Зависимость мощности излучения 1-го порядка дифракции P_1 от угла падения Θ при оптимальной глубине рельефа каждой из двух фазовых ДР, входящих в состав блока ДР, выражается следующей формулой, которую можно получить из формулы (15)

$$P_{\pm 1}(\Delta\Theta) = P_i \left[\frac{2}{\pi^2} + \frac{2}{\pi^2} \cos\left(\frac{2\pi d\Delta\Theta}{n\Lambda} \pm L\right) \right]. \quad (17)$$

На линейном участке зависимости мощности от угла поворота блока ДР крутизна преобразования угла поворота блока в изменение мощности первого порядка дифракции составит

$$S_{\Theta-P} = \frac{dP_1}{d\Theta} = P_i \frac{4d}{\pi n\Lambda}. \quad (18)$$

Например, в исследуемом макете расстояние между ДР составляло 13 мм, показатель преломления блока ДР — 1,51, а период ДР — 0,1 мм. При этих параметрах и при мощности лазера 5 мВт расчетная крутизна составляла $S_{\Theta-P} = 548$ мВт/рад. Для детектирования сигнала применяется фотодиод ФД-24к с крутизной преобразования мощности в фототок $S_{P-i} = 0,24$ А/Вт. При этом крутизна преобразования приращения углового отклонения в приращение тока составит $S_{\Theta-i} = 132$ мА/рад. Соответственно на резисторе нагрузки $R_{load} = 10$ кОм крутизна изменения выходного напряжения составит 1320 В/рад. При расположении грузика на расстоянии 0,12 м от оси вращения получим следующую характеристику крутизны преобразования смещения грузика в выходное напряжение: 11000 В/м.

Проведем оценку уровня шумов электронной схемы. На выходе фотодетектора, расположенного в 1-ом порядке дифракции, существует постоянная составляющая мощности излучения $P_{c1} = 0,2P_i$. При $P_i = 5$ мВт получаем $P_{c1} = 1$ мВт. При этом постоянный фототок равен $i = 0,24$ мА, а соответствующее ему среднеквадратическое значение тока дробового шума можно рассчитать по формуле $i_{sn} = \sqrt{2q_i\Delta f}$, где q — заряд электрона, Δf — полоса пропускания канала регистрации, i — постоянный ток. При $\Delta f = 1800$ Гц расчетное значение среднеквадратического тока дробовых шумов составит $i_{sn} = 3,7 \times 10^{-10}$ А. Для сравнения, расчетный тепловой шумовой ток резистора нагрузки $R_{load} = 10$ кОм составит $i_n = 3,15 \times 10^{-12}$ А. Как видно, уровень дробового шума, порождаемого постоянной составляющей фототока, существенно превышает уровень теплового шума резистора нагрузки. Если чувствительность датчика оценивать по уровню дробовых шумов, пренебрегая тепловыми шумами резистора нагрузки, то при отношении сигнал/шум, равном 10, она составила бы $10(i_{sn}/S_{\Theta-i}) = 0,28 \times 10^{-7}$ рад. Однако эта оценка занижена, так как не учитывает

дополнительных шумов, производимых источником лазерного излучения. Наши эксперименты по измерению уровня шумов, проведенные с парой лазер–фотодетектор без блока ДР, чтобы исключить влияние сейсмических шумов, показали, что уровень шумов на выходе фотодиода при воздействии на него излучения полупроводникового лазера превышает в 10 раз тот фактический уровень дробовых шумов и шумов электронной схемы, который наблюдался при эквивалентных параметрах тока в нагрузке фотодиода, но без облучения фотодиода лазером. Это наблюдение приводит к выводу о том, что оценку уровня чувствительности схемы следует увеличить в 10 раз по сравнению с оценкой, рассчитанной с учетом только дробовых шумов, но без учета дополнительных шумов от лазерного излучения. Тогда, с учетом увеличения в 10 раз, оценка чувствительности прибора составит $0,28 \times 10^{-6}$ рад.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАКЕТА СЕЙСМОМЕТРА С ОПТИЧЕСКИМ ДИФРАКЦИОННЫМ ДАТЧИКОМ КОЛЕБАНИЙ

Параметры макета были приведены выше. При испытаниях макет был размещен на платформе. На этой же платформе параллельно был установлен серийный сейсмометр СМ-3 для сравнения реакций двух приборов на механическое возмущение. Период собственных колебаний маятника СМ-3 составлял 0,6 с.

Далее представлены результаты двух серий экспериментов. В первом эксперименте платформа с сейсмометрами была установлена на массивной платформе голограммического стола, которая подвешена на подушке, наполненной воздухом. При небольшом боковом толчке голограммическая платформа совершила медленно затухающие колебания с периодом 0,475 с. На рис. 4 приведены осциллограммы сигналов с выходов двух сейсмометров, установленных на платформе голограммического стола. Масштабы по вертикали выбраны так, чтобы амплитуды кривых были примерно одинаковы. Как видно из рисунка, сигнал с выхода макета сейсмометра имеет фазовый сдвиг 90° относительно сигнала с выхода сейсмометра СМ-3. При этом экстремумы сигнала с выхода СМ-3 соответствуют тем участкам кривой, полученной с выхода макета сейсмометра, где

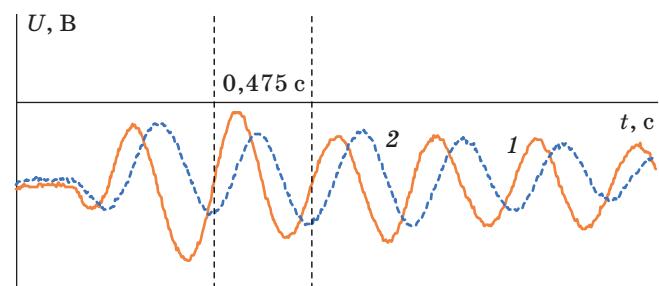


Рис. 4. Осциллограммы сигналов с выходов сейсмометров, размещенных на поверхности платформы голограммического стола. 1 — сигнал с выхода сейсмометра СМ-3, 2 — сигнал с выхода макета сейсмометра с оптическим дифракционным датчиком

скорость нарастания сигнала экстремальна. В то же время максимумам сигнала с выхода макета сейсмометра соответствуют нулевые значения сигнала с выхода СМ-3. Эти наблюдения подтверждают тот факт, что сигнал с выхода макета сейсмометра с оптическим дифракционным датчиком пропорционален смещению поверхности, на которой установлен макет, а сигнал с выхода СМ-3, который снабжен индуктивным датчиком, пропорционален производной от смещения маятника и связанной с ним катушки индуктивности относительно магнита, установленного на основании прибора.

Далее рассмотрим результаты экспериментов, полученных при медленном перемещении платформы с сейсмометрами. Для проведения этих испытаний платформа с сейсмометрами устанавливалась на цилиндрические катки на поверхность неподвижного массивного стола. Платформа с сейсмометрами приводилась в поступательно-возвратное медленное движение. На рис. 5 приведены осциллограммы, записанные с выходов сейсмометров. На кривой 2, представляющей сигнал с выхода макета сейсмометра с оптическим дифракционным датчиком, видны два ярко выраженных отрицательных импульса, которые получены в результате медленных малых сдвигов платформы на катках в направлении Oy . Кривая 1 представляет сигнал с выхода сейсмометра СМ-3. Здесь воздействие первого импульса сдвига практически неотличимо от случайных флуктуаций. Реакция на второй толчок более заметна, поскольку воздействие было более сильным и быстрым. Следует отметить,

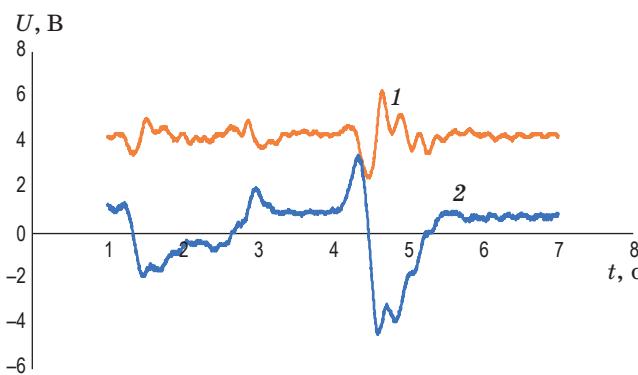


Рис. 5. Осциллограммы сигналов с выходов сейсмометров при медленных толчках платформы. 1 — сигнал с выхода сейсмометра СМ-З, 2 — сигнал с выхода макета сейсмометра с оптическим дифракционным датчиком

что здесь, как и на рис. 4, максимальным и минимальным значениям сигнала на выходе макета сейсмометра соответствуют нулевые значения сигнала с выхода СМ-З. Это обстоятельство связано с тем, что сигнал с датчика СМ-З пропорционален скорости движения маятника и катушки индуктивности, а скорость в точке максимального отклонения маятника равна нулю. Дополнительно следует отметить, что макет прибора с оптическим датчиком практически не реагировал на ударные возмущения по двум другим координатам ($0x$ и $0z$), в то время как сейсмометр СМ-З демонстрировал заметную реакцию на такие воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Макет сейсмометра с оптическим дифракционным датчиком угловых колебаний продемонстрировал высокую чувствительность при исследовании колебаний поверхности в определенном горизонтальном направлении. Сейсмометры с такими датчиками могут найти применение при исследованиях низкочастотных колебаний земной поверхности. Чувствительность датчика угловых перемещений зависит от периодов ДР и от расстояния между ДР. Конструкция устройства достаточно проста, а технология изготовления ДР с использованием фотолитографии и химического травления хорошо отработана и доступна. Как известно, датчики, у которых выходной сигнал пропорционален смещению, а не скорости перемещения подвижного элемента применяются при создании длиннопериодных сейсмометров, где используется принцип следящей системы с отрицательной обратной связью. На основе схемы макета сейсмометра с рассмотренным здесь оптическим датчиком угловых перемещений также может быть построен сейсмометр с отрицательной обратной связью. Проведенные экспериментальные исследования макета сейсмометра с оптическим дифракционным датчиком на практике показали достоинства новой схемы построения прибора и возможность применения для измерения слабых колебаний поверхности в горизонтальном направлении.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Duncan C.A. Strainmeters and tiltmeters // Reviews of Geophysics. 1986. V. 24. № 3. P. 579–624. DOI: 10.1029/RG024i003p00579
2. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Особенности применения лазерных деформографов классического и маятникового типов // Фotonika. 2021. Т. 15. № 6. С. 474–483. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos-2021-15-6-474-483
3. Tianying C., Zhongmin W., Yue Y., Yaolu Z., Zhifeng Z., Liyao C., Hong L. Fiber optic interferometric seismometer with phase feedback control // Opt. Exp. 2020. V. 28. № 5/2. P. 6102–6122.
4. Буродышева О.В., Никулин И.Л. Волоконно-оптический датчик вибрации // Фotonika. 2019. Т. 13. № 1. С. 80–85. DOI: 10.22184/FRos-2019-13-1-80-85
5. Одиноков С.Б., Шишова М.В., Жердев А.Ю., Ковалев М.С., Галкин М.Л., Венедиктов В.Ю. Моделирование фазовых сдвигов света в порядках дифракционных решеток интерференционного датчика линейных перемещений // Опт. спектр. 2019. Т. 127. № 9. С. 469–476. DOI: 10.21883/OS-2019-09-48205-112-19
6. Комоцкий В.А., Суетин Н.В. Горизонтальный сейсмометр с оптоэлектронным дифракционным датчиком колебаний // Патент № 203735U1 RU. 19.04.2021.
7. Комоцкий В.А., Соколов Ю.М. Анализ интенсивностей дифракционных порядков в оптической схеме, содержащей две фазовые дифракционные решетки // Вестник РУДН. Сер. Физика. 2006. № 1. С. 90–95.

8. Комоцкий В.А., Корольков В.И., Соколов Ю.М. Исследование датчика малых линейных перемещений на основе двух фазовых дифракционных решеток // Автометрия. 2006. Т. 42. № 6. С. 105–112.
9. Комоцкий В.А., Корольков В.И., Соколов Ю.М. Оптоэлектронные дифракционные датчики малых угловых перемещений // Фотоника. 2011. Т. 25. № 1. С. 16–19.
10. Komotskii V.A., Sokolov Yu.M., Suetin N.V. New optoelectronic schemes constructed based on relief reflective diffractive structures with rectangular profile // Photonics. 2019. V. 13. № 4. P. 393–404. DOI: 10.22184/FRos-2019-13-4-392-404
11. Komotskii V.A., Sokolov Yu.M., Basisty E.V. Depth measurement of the periodic grooved reflectors of surface acoustic waves using the laser probing // J. Commun. Technol. and Electronics. 2011. V. 56. № 2. P. 220–225.
12. Комоцкий В.А., Суэтин Н.В. Макет горизонтального сейсмометра с оптоэлектронным дифракционным датчиком колебаний // Тез. докл. XVIII междунар. научной конф. по голограммии и прикладным оптическим технологиям. Москва, 20–23 сентября 2021. С. 162–168.
13. Комоцкий В.А. Основы когерентной оптики и голограммии. Конспект лекций. М.: изд. РУДН, 2011. 165 с.

АВТОРЫ

Владислав Антонович Комоцкий — доктор технических наук, профессор, Российский университет дружбы народов, факультет физико-математических и естественных наук, Москва, 117198, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-0997-8182>; vkomotskii@mail.ru

Никита Владимирович Суэтин — инженер-физик, Российский университет дружбы народов, факультет физико-математических и естественных наук, Москва, 117198, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-6602-3606>; ponama911@gmail.com

AUTHORS

Vladislav A. Komotskii — Doctor of Technical Sciences, Professor, RUDN University, Moscow, 117198, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-0997-8182>, vkomotskii@mail.ru

Nikita V. Suetin — engineer, RUDN University, Moscow, 117198, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-6602-3606>; ponama911@gmail.com

Статья поступила в редакцию 13.12.2021, одобрена после рецензирования 25.02.2022, принятая к печати 29.03.2022