

09.5

Волоконно-оптический интерферометрический акселерометр горизонтального типа для сейсмоакустического мониторинга

© О.Т. Каменев^{1,2}, А.О. Каменев², Ю.С. Петров¹, А.А. Подлесных¹¹ Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия² Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

E-mail: okamenev@mail.ru

Поступило в Редакцию 7 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 5 мая 2023 г.

Принято к публикации 6 мая 2023 г.

Показана возможность построения волоконно-оптического акселерометра горизонтального типа на основе многовиткового чувствительного элемента, оптической схемы интерферометра Маха–Цендера и пассивной фазовой демодуляции. Проведены лабораторные испытания прототипа акселерометра. Чувствительность представленного волоконно-оптического акселерометра к колебательному ускорению составляет 1770 rad/g, полоса рабочих частот 10–130 Hz, пороговая чувствительность к ускорению $5 \cdot 10^{-8} g$, поперечная чувствительность 9%.

Ключевые слова: акселерометр, интерферометр, оптическое волокно.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.13.55734.19582

Проблема создания систем сейсмоакустического мониторинга состояния природных и техногенных объектов является весьма актуальной для решения задач геофизики, безопасности жизнедеятельности, рационального природопользования и т. д. При этом сейсмоускорение считается наиболее информативным параметром [1], так как оно прямо пропорционально силе источника сейсмического события. Для регистрации сейсмоускорения, как правило, используются инерциальные акселерометры, в которых амплитуда колебаний инерционной массы на низких частотах прямо пропорциональна амплитуде сейсмоускорения. Требования к пороговой чувствительности инерциальных акселерометров весьма высоки. Поэтому при создании акселерометров, предназначенных для регистрации слабых низкочастотных сейсмосигналов, необходимо обеспечить их пороговую чувствительность порядка $10^{-8} g$, что соответствует смещениям инерционной массы на величину порядка $10^{-12} m$ [2]. В том случае, когда речь идет о создании переносных сейсмоакустических измерительных устройств, только применение волоконно-оптических интерферометров позволяет обеспечить указанную чувствительность [3].

Для построения волоконно-оптических интерферометрических акселерометров применяются различные конструкции чувствительных элементов (ЧЭ), среди которых выделяются многовитковые ЧЭ, способные обеспечить пороговую чувствительность порядка $10^{-8} g$ [4,5]. Однако применяемые в них активные методы фазовой демодуляции снижают помехозащищенность и ограничивают динамический диапазон, в то время как пассивные методы фазовой демодуляции лишены подобных недостатков.

В настоящей работе представлен волоконно-оптический интерферометрический акселерометр горизонталь-

ного типа с многовитковым ЧЭ и пассивной фазовой демодуляцией на основе разветвителя 3×3 [6].

На рис. 1 представлена схема акселерометра. Излучение полупроводникового DFB-лазера по одномодовому волоконному световоду (ВС) направляется в волоконно-оптический интерферометр Маха–Цендера, образованный Y-разветвителем, ВС опорного плеча, ВС измерительного плеча и разветвителем 3×3 . В акселерометре применяется InGaAsP-лазер с распределенной обратной связью NOLATECH DFB-1550-AX (длина волны 1549.94 nm, ширина спектральной линии 5 MHz, оптическая мощность до 1 mW). ВС измерительного плеча интерферометра намотан на цилиндры подвижной и неподвижной частей механического линейного транслятора многовиткового ЧЭ. Транслятор содержит пружину и шариковые подшипники. В чувствительном элементе применяется одномодовый волоконный световод длиной 80 см стандарта ITU-T 657.A с уменьшенными потерями на изгибах. Разность длин плеч интерферометра составляет 5 mm.

Подвижная часть, являясь инерционной массой, находится в равновесии под действием сил упругости, действующих со стороны пружины механического линейного транслятора и световода измерительного плеча. При регистрации колебаний корпуса акселерометра с амплитудой колебательного ускорения a_0 инерционная масса совершает вынужденные колебания. Это приводит к колебаниям длин распрямленных участков световода измерительного плеча интерферометра и, как следствие, к колебаниям разности фаз распространяющихся в плечах интерферометра оптических волн с амплитудой φ_0 . В результате интерференции этих волн в разветвителе 3×3 на его выходах формируются три оптических сигнала, сдвинутых по фазе относительно друг друга на $2\pi/3$.

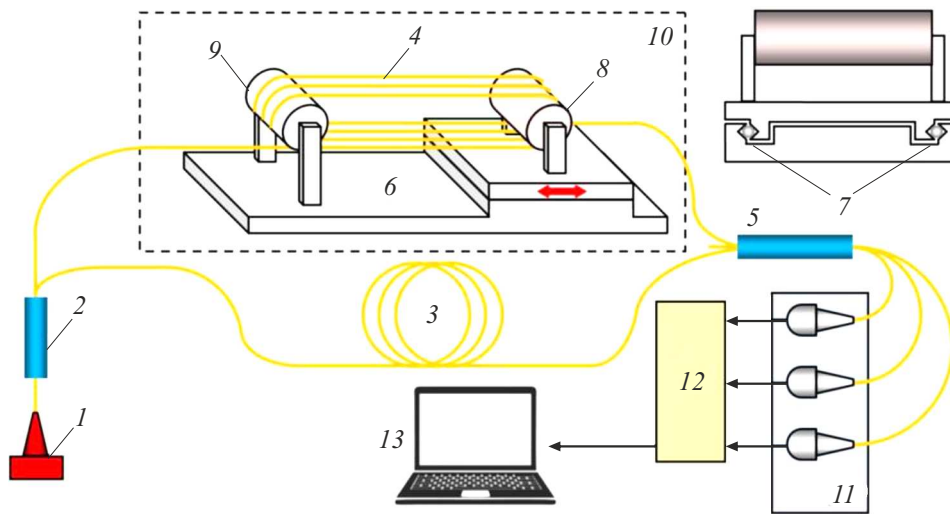


Рис. 1. Схема волоконно-оптического интерферометрического акселерометра горизонтального типа. 1 — DFB-лазер, 2 — Y-разветвитель, 3 — ВС опорного плеча интерферометра, 4 — ВС измерительного плеча интерферометра, 5 — разветвитель 3 × 3, 6 — механический линейный транслятор с пружиной и шариковыми подшипниками, 7 — шариковые подшипники, 8 — цилиндр подвижной части транслятора, 9 — цилиндр неподвижной части транслятора, 10 — многовитковый ЧЭ, 11 — блок фотоприемников, 12 — АЦП, 13 — ноутбук.

Эти сигналы регистрируются блоком из трех фотоприемников. Для регистрации оптического сигнала используются фотодиодные модули NOLATECH ФДМ-14-2К (рабочая длина волны 1100–1600 nm, чувствительность 0.9 A/W). Сформированные ими электрические сигналы через четырехканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) Zetlab ZET230 (24 разряда, 25 kHz на канал) направляются на персональный компьютер, где обрабатываются в соответствии с алгоритмом, описанным в работе [6]. В результате восстанавливается изменение разности фаз распространяющихся в плечах интерферометра оптических волн.

Чувствительность акселерометра к колебательному ускорению определяется выражением [2]:

$$S = \varphi_0 / a_0 = (Nn / \pi f_0^2 \lambda) / \sqrt{(1 - (f / f_0)^2)^2 + (2\varepsilon(f / f_0))^2}, \quad (1)$$

где λ — длина волны источника оптического излучения, n — показатель преломления сердцевины световода, ε — коэффициент трения, N — количество распрямленных участков волоконного световода многовиткового ЧЭ, длины которых изменяются при регистрации ускорения, f — частота колебаний, f_0 — собственная частота колебательной системы, определяемая выражением

$$f_0 = \sqrt{Nk_c / 4\pi^2 m}, \quad (2)$$

где k_c — коэффициент упругости одного участка волоконного световода, m — инерционная масса.

На рис. 2 представлена рассчитанная по формуле (1) амплитудно-частотная характеристика волоконно-оптического интерферометрического акселерометра горизонтального типа. При расчетах использовались

следующие параметры акселерометра: $n = 1.47$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $m = 0.31 \text{ kg}$, $N = 6$, $k_c = 20 \text{ kN/m}$, $\varepsilon = 0.22$. Символами представлены экспериментальные данные, полученные при возбуждении горизонтальных колебаний с амплитудой $5 \cdot 10^{-4} g$ электродинамической виброустановкой ВСВ-133. Параметры виброустановки были следующими: диапазон частот 10–1000 Hz, номинальная нагрузка в горизонтальном положении 2.5 kg, коэффициент нелинейных искажений не более 3%. Как видно из рис. 2, чувствительность волоконно-оптического акселерометра к колебательному ускорению на горизонтальном участке амплитудно-частотной характеристики (область низких частот) составляет 1770 rad/g.

Как показали результаты экспериментальных исследований прототипа акселерометра, чувствительность к поперечным колебаниям не превышает 9%.

На рис. 3 представлены спектры выходного сигнала волоконно-оптического акселерометра и пьезо-

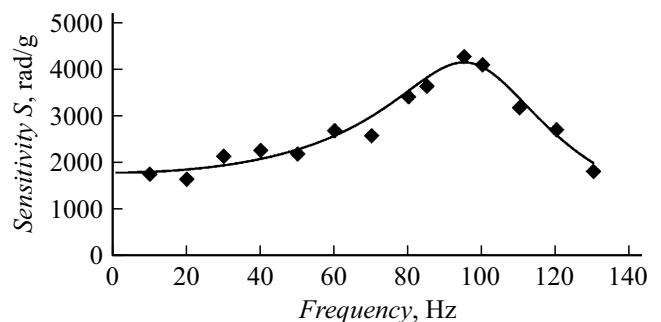


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика волоконно-оптического акселерометра.

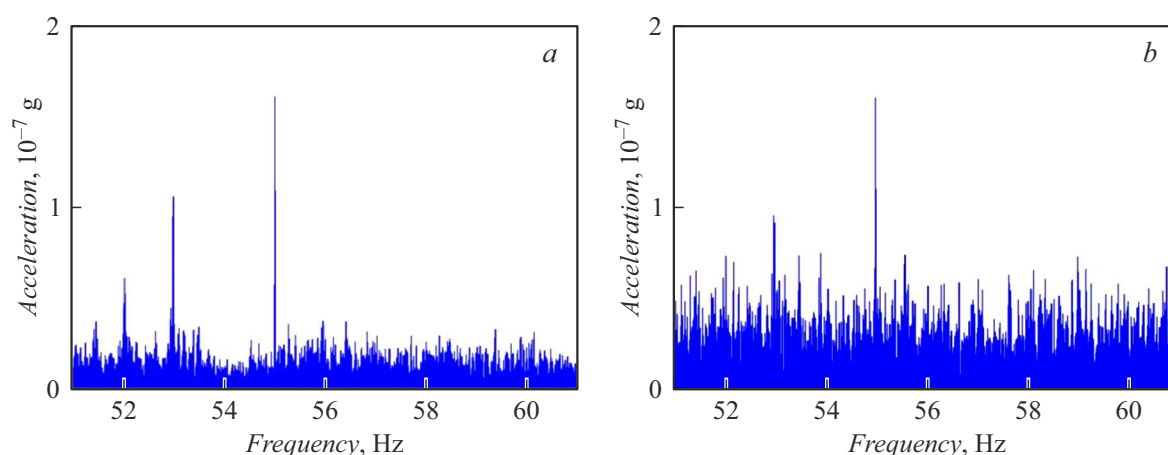


Рис. 3. Спектр выходного сигнала волоконно-оптического акселерометра (а) и пьезоэлектрического акселерометра BC1313 (b).

электрического акселерометра BC1313, полученные при регистрации колебательного ускорения амплитудой $1.6 \cdot 10^{-7}g$ и частотой 55 Hz. Как видно из рис. 3, уровень собственных шумов волоконно-оптического акселерометра меньше, чем у пьезоэлектрического, и обеспечивает возможность регистрации ускорений до $5 \cdot 10^{-8}g$.

Таким образом, в работе представлены принципы построения высокочувствительного волоконно-оптического акселерометра горизонтального типа на основе применения многовиткового чувствительного элемента, оптической схемы интерферометра Маха–Цендера и пассивной фазовой демодуляции. Полученные результаты открывают перспективы построения высокочувствительных помехозащищенных сейсмоакустических систем мониторинга.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J. Havskov, G. Alguacil, *Instrumentation in earthquake seismology* (Springer, Netherlands, 2010), p. 1–2.
- [2] Ю.Н. Кульчин, О.Т. Каменев, Ю.С. Петров, В.А. Колчинский, А.А. Подлесных, Изв. вузов. Приборостроение, **62** (3), 291 (2019). DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-3-291-296
- [3] Э. Удд, *Волоконно-оптические датчики* (Мир, М., 2008), с. 275. [E. Udd, *Fiber optic sensors* (Wiley, Hoboken, 2011)].
- [4] Y. Yang, Z. Wang, T. Chang, M. Yu, J. Chen, G. Zheng, H.-L. Cui, *IEEE Access*, **8**, 1374 (2020). DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2961963
- [5] Ю.Н. Кульчин, О.Т. Каменев, Ю.С. Петров, Р.В. Ромашко, В.А. Колчинский, Изв. РАН. Сер. физ., **82** (5), 556 (2018). DOI: 10.3103/S1062873818050192 [Yu.N. Kulchin, O.T. Kamenev, Yu.S. Petrov, R.V. Romashko, V.A. Kolchinskiy, *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, **82** (5), 487 (2018). DOI: 10.3103/S1062873818050192].
- [6] D.A. Brown, C.B. Cameron, R.M. Keolian, D.L. Gardner, S.L. Garrett, *Proc. SPIE*, **1584**, 328 (1991). DOI: 10.1117/12.50954