

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Ю. Н. КУЛЬЧИН¹, О. Т. КАМЕНЕВ¹, Ю. С. ПЕТРОВ¹,
В. А. КОЛЧИНСКИЙ¹, А. А. ПОДЛЕСНЫХ²

¹Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН,
690041, Владивосток, Россия

E-mail: okatenev@mail.ru

²Дальневосточный федеральный университет, 690001, Владивосток, Россия

Представлен волоконно-оптический акселерометр на базе интерферометра Маха — Цендера с активной системой стабилизации рабочей точки. Приведены результаты полевых испытаний акселерометра, подтверждающие возможность его применения для мониторинга природных и техногенных объектов.

Ключевые слова: волоконно-оптический интерферометр, сейсмосигнал, акселерометр

Проблема разработки инструментальных средств мониторинга природных и техногенных объектов является весьма актуальной для решения задач геофизики, безопасности жизнедеятельности, рационального природопользования и т.д. При этом значительное внимание уделяется регистрации низкочастотных сейсмосигналов, причем сейсмоускорение считается наиболее информативным параметром [1], так как оно прямо пропорционально силе источника. Кроме того, только сейсмоускорение можно регистрировать напрямую с использованием инерционных датчиков, так как на низких частотах амплитуда колебаний инертной массы прямо пропорциональна амплитуде сейсмоускорения. Требования к пороговой чувствительности современных акселерометров весьма высоки. Так, для регистрации колебаний поверхности объекта амплитудой 100 нм на частоте 0,05 Гц необходимо обеспечить пороговую чувствительность к сейсмоускорению порядка 10^{-8} м/с² [2]. Если частота резонанса колебательной системы равна 50 Гц, то амплитуда колебаний инертной массы составит величину порядка 10^{-13} м, что соответствует тепловым шумам, возникающим в колебательной системе. Отсюда следует, что при создании акселерометров, предназначенных для регистрации слабых низкочастотных сейсмосигналов, необходимо обеспечить пороговую чувствительность не хуже 10^{-7} м/с², что соответствует смещениям инертной массы на величину порядка 10^{-12} м.

Для достижения указанных параметров акселерометра целесообразно применение интерферометрических методов измерений. Применение волоконно-оптических интерферометров позволяет обеспечить указанную чувствительность к измерению смещений [3]. Создание волоконно-оптических интерферометрических сейсмоприемников в 80-х годах прошлого столетия затруднялось низким качеством элементной базы, применяемой в волоконной оптике. Поэтому разработки не выходили за стены научных лабораторий. Наметившийся в последние годы повышенный интерес к интерферометрическим волоконно-оптическим датчикам является следствием развития элементной базы оптоэлектроники и волоконной оптики. Но, как и раньше, проблема дрейфа рабочей точки волоконно-оптического интерферометра существенно ограничивает его применение в переносных сейсмоприемниках.

В настоящей статье представлен волоконно-оптический интерферометрический акселерометр на основе интерферометра Маха — Цендера, в котором применяется метод активной стабилизации рабочей точки. Оптическая схема интерферометра Маха — Цендера представляется авторам наиболее удобной для создания измерительных преобразователей, так как она

не требует нанесения отражающих покрытий на торцы волоконных световодов, что необходимо в случае применения схем Майкельсона или Фабри — Перо.

Структурная схема акселерометра представлена на рис. 1, где 1 — DFB-лазер; 2 — волоконный световод; 3 — Y-разветвитель; 4 — фазовый модулятор; 5 — усилитель; 6 — многовитковый чувствительный элемент (МЧЭ); 7 — X-разветвитель; 8 — фотоприемник; 9 — аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 10 — персональный компьютер; 11 — цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Излучение DFB-лазера мощностью 1 мВт разделяется волоконно-оптическим Y-разветвителем на два плеча интерферометра Маха — Цендера — опорное и измерительное, образованные одномодовыми волоконными световодами. Интерференция осуществляется выходным X-разветвителем; на его выходе формируются два оптических сигнала, интенсивность которых изменяется в противофазе. Дифференциальная регистрация этих сигналов обеспечивает автоматическое исключение постоянной составляющей выходного сигнала интерферометра и удвоение полезного сигнала.

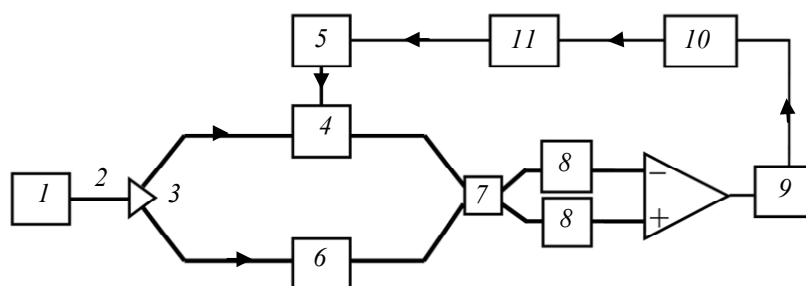


Рис. 1

Размещенный в измерительном плече интерферометра многовитковый чувствительный элемент, описанный в работе [4], преобразует ускорения корпуса акселерометра в изменение разности фаз оптического излучения в опорном и измерительном плечах интерферометра. Коэффициент преобразования МЧЭ определяется отношением изменения разности фаз φ_0 к сейсмоускорению a_0 , которое его вызвало [4]:

$$S_1 = \frac{\varphi_0}{a_0} \cong \frac{NnV}{\pi f_0^2 \lambda}, \quad (1)$$

где N — количество витков световода измерительного плеча, n — показатель преломления сердцевины световода измерительного плеча, V — коэффициент, определяемый конструктивными особенностями колебательной системы МЧЭ, λ — длина волны излучения лазера, f_0 — резонансная частота, определяемая как

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

где k_f — коэффициент упругости волоконного световода, m — инерционная масса.

При $k_f = 16,3$ кН/м, $N = 10$ и $m = 0,51$ кг резонансная частота $f_0 = 90$ Гц. При $n = 1,5$, $V = 0,63$ и $\lambda = 1,55$ мкм коэффициент преобразования МЧЭ $S_1 = 240$ рад/(м/с²). Как видно из выражений (1) и (2), увеличение количества витков световода в МЧЭ не приведет к повышению его чувствительности. Но если при этом пропорционально увеличить инерционную массу, то повышение чувствительности становится возможным, причем без изменения резонансной частоты.

X-разветвитель и фотоприемники с дифференциальным усилителем формируют оптоэлектронный преобразователь, который преобразует изменение фазы φ_0 в выходное напряжение акселерометра $U_{\text{вых}}$. Соответствующий коэффициент преобразования $S_2 = U_{\text{вых}}/\varphi_0$ определяется положением рабочей точки интерферометра, параметрами фотоприемников и дифференциального усилителя. Если рабочая точка находится на линейном участке передаточной характеристики, то для изготовленного образца акселерометра $S_2 = 4$ В/рад. Общий коэффи-

циент преобразования $S = S_1 S_2 = 960 \text{ В}/(\text{м}/\text{с}^2)$. Изменение S в диапазоне частот от 1 до 50 Гц не превышает 10 В. При уровне собственных шумов 100 мкВ пороговая чувствительность сейсмоприемника составляет величину порядка $10^{-7} \text{ м}/\text{с}^2$.

Стабильность работы акселерометра при изменении условий окружающей среды достигается за счет применения метода активной стабилизации рабочей точки интерферометра. Для этого в опорное плечо помещен фазовый модулятор, управляемый персональным компьютером через ЦАП. Этот метод, рассмотренный в работе [5], эффективен в закрытых помещениях. Как показали результаты полевых испытаний волоконно-оптического акселерометра, непосредственное применение этого метода в полевых условиях приводит к необходимости повышения частоты отсечки системы стабилизации до 4 Гц, что неприемлемо для сейсмоприемника, так как эта частота становится нижней границей диапазона регистрируемых частот. Для частичного решения данной проблемы алгоритм работы системы стабилизации был дополнен модулем, обеспечивающим подстройку параметров алгоритма к особенностям регистрируемого сигнала. Также были приняты меры по теплоизоляции корпуса акселерометра. Это позволило уменьшить частоту отсечки до 0,1 Гц (значение, устанавливаемое в закрытых помещениях). В результате диапазон регистрируемых частот акселерометра — 0,1...50 Гц. Система регистрации позволяет фиксировать сигналы до 500 Гц, при этом, однако, следует учитывать нелинейность частотной зависимости коэффициента преобразования в диапазоне выше 50 Гц.

Для проверки эффективности работы волоконно-оптического акселерометра были проведены испытания на одной из сейсмических станций Камчатского филиала Геофизической службы РАН. В ходе эксперимента сравнивались выходные сигналы волоконно-оптического акселерометра и z -компонента форсбалансного акселерометра Guralp-5T с пороговой чувствительностью $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}/\text{с}^2$ и диапазоном частот 0...40 Гц. На рис. 2 показаны сигналы на выходе акселерометра Guralp-5T (а) и волоконно-оптического (б), записанные во время землетрясения магнитудой 4,7, произошедшего у берегов Камчатки 2 декабря 2017 г. Частотный диапазон сигнала 2...20 Гц. Длительность сигнала 2 мин. Как видно из рисунка, оба акселерометра регистрируют сейсмоускорение порядка $10^{-3} \text{ м}/\text{с}^2$. При этом можно отметить, что на сейсмограмме волоконно-оптического акселерометра (см. рис. 2, б) разница между p - и s -волнами выражена более отчетливо. Также можно отметить, что уровень постоянной шумовой составляющей 16,6 Гц у волоконно-оптического акселерометра существенно ниже. По-видимому, шум имеет электромагнитный характер (станция расположена в черте города), а чувствительный элемент волоконно-оптического акселерометра невосприимчив к таким помехам. Шумовой сигнал наводится через пьезокерамический модулятор, который является „слабым“ звеном волоконно-оптического акселерометра.

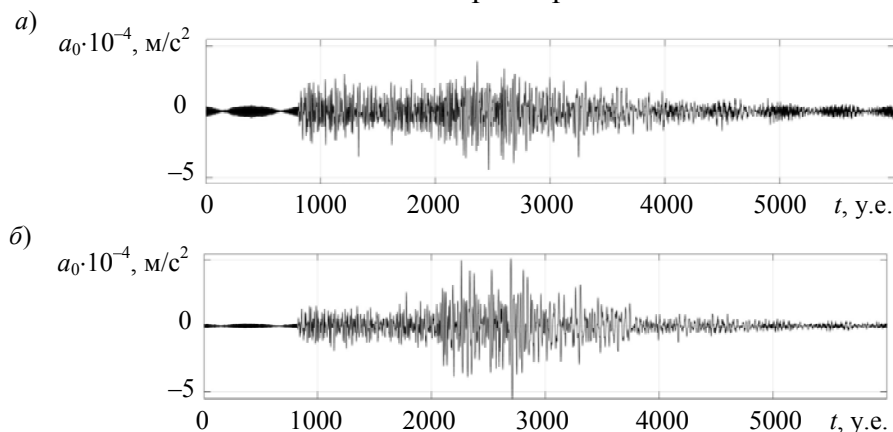


Рис. 2

Следующий эксперимент проводился в 2018 г. в полевых условиях в сейсмически активной зоне на перешейке между двумя действующими камчатскими вулканами Авачинский

и Корякский. На рис. 3 показаны сигналы на выходе волоконно-оптического акселерометра (а) и молекулярно-электронного велосиметра СМЕ-6011 (б), чувствительность которого 2000 В/(м/с), частотный диапазон 0,033...50 Гц. На сейсмограммах видны сейсмические события, регистрируемые обоими датчиками. Пример зарегистрированного сейсмосигнала представлен на рис. 4. Уровень регистрируемого акселерометром сейсмоускорения (рис. 4, а) составляет величину порядка 10^{-3} м/с², а уровень регистрируемой велосиметром сейсмоскорости — величину порядка $5 \cdot 10^{-6}$ м/с. Как видно из рис. 3, количество событий, регистрируемых акселерометром, выше, чем велосиметром.

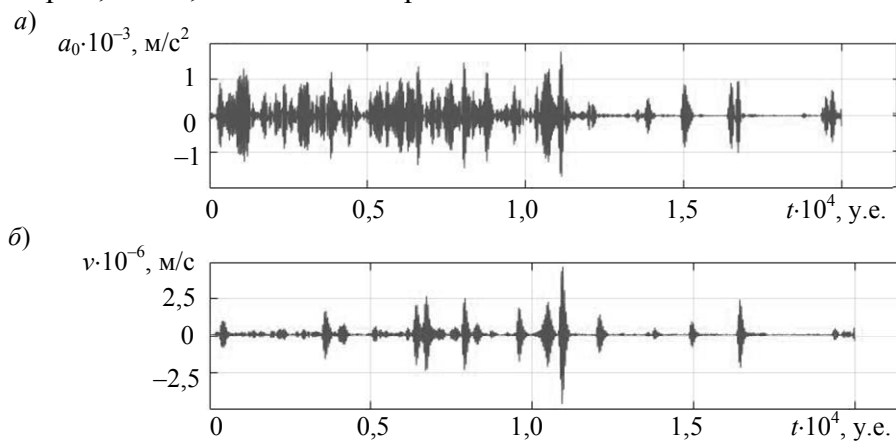


Рис. 3

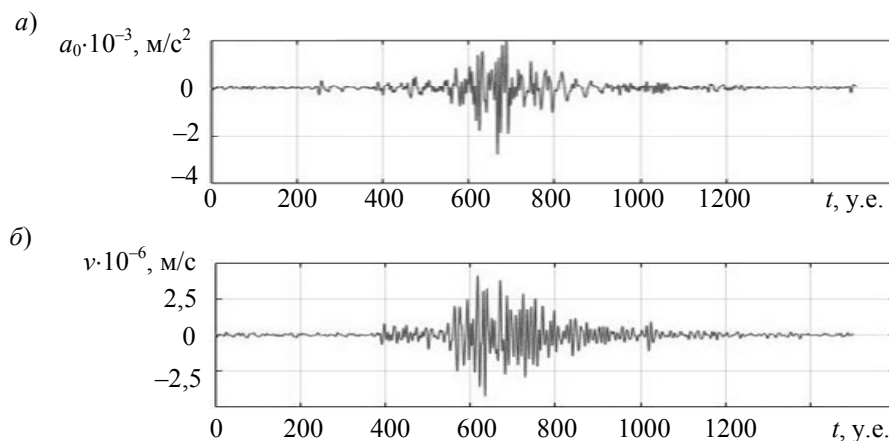


Рис. 4

Таким образом, результаты испытаний волоконно-оптического акселерометра на основе интерферометра Маха — Цендера демонстрируют возможность применения активной системы стабилизации рабочей точки интерферометра в полевых условиях. Это открывает перспективы практического применения волоконно-оптического интерферометра Маха — Цендера в системах мониторинга природных и техногенных объектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 16-29-02082 и 16-05-00750).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Havskov J., Alguacil G. Instrumentation in Earthquake Seismology. Springer Netherlands, 2010. 347 p.
2. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. М.: Мир, 1983.
3. Волоконно-оптические датчики / Под ред. Э. Удда. М.: Техносфера, 2008. 520 с.
4. Kamenev O. T., Kulchin Yu. N., Petrov Yu. S., Khiznyak R. V., Romashko R. V. Fiber-optic seismometer on the basis of Mach-Zehnder interferometer // Sensors and Actuators A. 2016. Vol. 244. P. 133—137.

5. Jackson D. A., Priest R., Dandridge A., Tveten A. B. Elimination of drift in a single-mode optical fiber interferometer using a piezoelectrically stretched coiled fiber // *Appl. Optics*. 1980. Vol. 19, N 17. P. 2926—2929.

Сведения об авторах

- Юрий Николаевич Кульчин** — д-р физ.-мат. наук, академик РАН; Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, лаборатория прецизионных оптических методов измерений; E-mail: director@iacp.dvo.ru
- Олег Тимурович Каменев** — д-р физ.-мат. наук; Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, лаборатория прецизионных оптических методов измерений; E-mail: okamenev@mail.ru
- Юрий Сергеевич Петров** — канд. техн. наук; Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, лаборатория прецизионных оптических методов измерений; ст. научный сотрудник; E-mail: oskanip@mail.ru
- Владислав Андреевич Колчинский** — Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, лаборатория прецизионных оптических методов измерений; мл. научный сотрудник; E-mail: vladko.88@mail.ru
- Александр Александрович Подлесных** — аспирант; Дальневосточный федеральный университет, школа естественных наук; E-mail: alex118usn@gmail.com

Поступила в редакцию
18.10.18 г.

Ссылка для цитирования: Кульчин Ю. Н., Каменев О. Т., Петров Ю. С., Колчинский В. А., Подлесных А. А. Волоконно-оптический интерферометрический акселерометр для мониторинга природных и техногенных объектов // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2019. Т. 62, № 3. С. 291—296.

FIBER-OPTIC INTERFEROMETRIC ACCELEROMETER FOR MONITORING OF NATURAL AND MAN-MADE OBJECTS

Yu. N. Kulchin¹, O. T. Kamenev¹, Yu. S. Petrov¹,
V. A. Kolchinskiy¹, A. A. Podlesnyh²

¹*Institute of Automation and Control Processes of Far Eastern Branch of the RAS,
690041, Vladivostok, Russia
E-mail: okamenev@mail.ru*

²*Far Eastern Federal University, 690001, Vladivostok, Russia*

A fiber-optic accelerometer based on the Mach-Zehnder interferometer with an active working point stabilization system is developed. Results of field tests of the accelerometer, confirming the possibility of its use for monitoring of natural and man-made objects, are presented.

Keywords: fiber-optic interferometer, seismic signal, accelerometer

REFERENCES

1. Havskov J., Alguacil G. *Instrumentation in Earthquake Seismology*, Springer Netherlands, 2010, 347 p.
2. Aki K., Richards P.G. *Quantitative Seismology, University Science Book*, 1980.
3. Udd E., ed., *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*, NY, John Wiley & Sons, 2011, 512 p. DOI: 10.1002/9781118014103.
4. Kamenev O.T., Kulchin Yu.N., Petrov Yu.S., Khiznyak R.V., Romashko R.V. *Sensors and Actuators A*, 2016, vol. 244, pp. 133–137.
5. Jackson D.A., Priest R., Dandridge A., Tveten A.B. *Applied Optics*, 1980, no. 17(19), pp. 2926–2929.

Data on authors

- Yuriy N. Kulchin** — Dr. Sci., Academician of the RAS; Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the RAS, Laboratory of Precision Optical Measurements Techniques; E-mail: director@iacp.dvo.ru
- Oleg T. Kamenev** — Dr. Sci.; Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the RAS, Laboratory of Precision Optical Measurements Techniques; E-mail: okamenev@mail.ru
- Yuriy S. Petrov** — PhD; Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the RAS, Laboratory of Precision Optical Measurements Techniques; Senior Researcher; E-mail: oskanip@mail.ru

- | | | |
|---------------------------------|---|---|
| Vladislav A. Kolchinskiy | — | Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the RAS, Laboratory of Precision Optical Measurements Techniques; Junior Researcher; E-mail: vladko.88@mail.ru |
| Aleksander A. Podlesnyh | — | Post-Graduate Student; Far Eastern Federal University, School of Natural Sciences; E-mail: alex118usn@gmail.com |

For citation: Kulchin Yu. N., Kamenev O. T., Petrov Yu. S., Kolchinskiy V. A., Podlesnyh A. A. Fiber-optic interferometric accelerometer for monitoring of natural and man-made objects. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 3. P. 291—196 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-3-291-296