



УДК 531.715.1

## Интерферометрия ускорения по спектру автодинного сигнала полупроводникового лазера

Ан. В. Скрипаль, С. Ю. Добдин, А. В. Джафаров,  
К. А. Садчикова, И. А. Дубровская

Скрипаль Анатолий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, skripalav@info.sgu.ru

Добдин Сергей Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, dobdinsy@info.sgu.ru

Джафаров Алексей Владимирович, магистрант кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, jafaralex@mail.ru

Садчикова Карина Арменаковна, аспирант кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, karinam94@mail.ru

Дубровская Ирина Алексеевна, студент кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, irinadubrovskaya@mail.ru

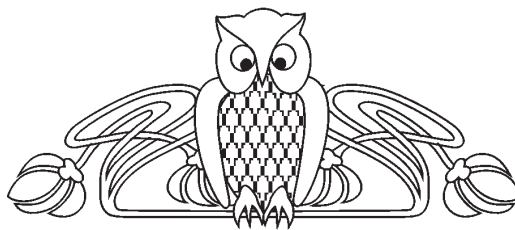
Предложен метод измерения ускорения, основанный на использовании алгоритма быстрого дискретного преобразования Фурье интерференционного сигнала лазерного автодина. Проведено моделирование спектра автодинного сигнала при равноускоренном движении отражателя. Показана взаимосвязь низкочастотных и высокочастотных составляющих спектра автодинного сигнала с величиной ускорения объекта. Показано, что для наиболее распространенного случая движения объекта с нулевой начальной скоростью наблюдается линейная зависимость высокочастотной спектральной составляющей от величины ускорения. Экспериментально реализован случай измерений равноускоренного движения объекта по спектру автодинного сигнала. Ускоренное движение отражателя осуществлялось с помощью генератора сигналов, встроенного в лабораторную станцию виртуальных приборов NIELVIS. Приведены результаты измерения движения пьезокерамики с ускорением, задаваемым квадратичным законом изменения напряжения на ней. Представлены результаты расчета ускорения по спектру автодинного сигнала для случая  $a = 26 \text{ мкм/с}^2$ . Разрешение предлагаемого метода оценивалось по изменению частот соседних спектральных составляющих и составило  $500 \text{ нм/с}^2$ .

**Ключевые слова:** лазерная интерферометрия, лазерный автодин, Фурье-спектр, измерение ускорения, спектр автодинного сигнала.

Поступила в редакцию: 20.07.2019 / Принята: 16.09.2019 /  
Опубликована: 02.12.2019

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-4-279-287>



### Введение

Лазерные автодинные системы, основанные на регистрации изменения мощности излучения лазерного диода при возвращении части излучения в его резонатор, обладают способностью к измерению микро- и наносмещений отражателя [1–3], используя для формирования интерференционного сигнала в качестве опорного канала свой собственный резонатор – активную область лазерного диода. Вследствие этого значительное упрощение схемы измерительной системы позволяет активно применять лазерный автодин для решения многочисленных задач по определению расстояния до объекта [4–6], угла поворота [7, 8], амплитуды вибраций [9–12], величины деформаций при микро- и наносмещениях [13, 14], скорости и ускорения движения отражателя [15–19]. Поскольку лазерные автодины не требуют дополнительных оптических элементов между источником излучения и тестируемой поверхностью, они оказываются востребованными в МЭМС интегральных датчиках. В отличие от МЭМС-акселерометров [20–22] в автодинных лазерных акселерометрах для восстановления функции движения отражателя требуется решение нелинейного уравнения, описывающего взаимосвязь отклика автодина с измеряемым параметром.

В настоящее время известны различные методы анализа автодинного сигнала акселерометра, такие как подсчет количества интерференционных максимумов на автодинном сигнале, метод минимизации невязки между квадратами отклонений экспериментальных и теоретических величин автодинного сигнала [23, 24], а также спектральные методы анализа формы автодинного сигнала [25].

Достигнутые успехи спектрального анализа формы автодинного сигнала позволяют определять скорость движения объекта [26, 27], амплитуду вибраций [10, 28], а также величину нано- и микросмещений и расстояние при модуляции тока питания лазерного диода [29, 30].



В работе [23] показана возможность измерения ускорения при неравномерно ускоренных микроперемещениях объекта величиной от 50 мкм/с<sup>2</sup> и выше. Вид функции движения отражателя с ускорением может быть также восстановлен с помощью методов вейвлет-преобразования [24].

Достижения спектрального анализа автодинного сигнала не были ранее применены для определения величины ускорения отражателя из-за сложности формы автодинного сигнала и его низкочастотного спектра. В настоящей работе предлагается метод определения ускорения отражателя, основанный на использовании алгоритма быстрого дискретного преобразования Фурье автодинного сигнала.

#### Формирование спектра автодинного сигнала

Переменная нормированная составляющая автодинного сигнала при движении внешнего отражателя записывается в виде [25]:

$$P = \cos(\omega(t) \cdot \tau(t)), \quad (1)$$

где  $\omega(t)$  – частота излучения полупроводникового лазера,  $\tau(t)$  – время обхода лазерным излучением расстояния  $L$  до внешнего отражателя, изменяющееся при движении отражателя.

Функция  $\omega(t)$  находится из фазового уравнения [31, 32]:

$$\omega_0 \tau = \omega \tau + C \cdot \sin(\omega \tau + \psi), \quad (2)$$

где  $C$  – уровень внешней оптической обратной связи,  $\psi = \arctg \alpha$ ,  $\alpha$  – ширина линии спектра излучения полупроводникового лазера. В случае слабой обратной связи  $C \ll 1$  изменением частоты излучения полупроводникового лазера можно пренебречь.

Расстояние  $L$  до внешнего отражателя может быть представлено в виде суммы неизменного начального расстояния до отражателя  $L_0$  и из-

меняющейся величины  $\Delta L(t)$  при движениях отражателя с ускорением. В этом случае переменная нормированная составляющая автодинного сигнала может быть представлена в виде:

$$P(t) = \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{\lambda_0} \left(\int_0^t (V_0 + \int_0^t a(t) dt) dt\right)\right), \quad (3)$$

где  $\theta = 4\pi L_0 / \lambda_0$  – набег фазы автодинного сигнала для начального расстояний до отражателя  $L_0$ ;  $\lambda_0$  – длина волны лазерного излучения;  $V_0$  – начальная скорость движения отражателя;  $a(t)$  – ускорение внешнего отражателя, изменяющееся во времени;  $t$  – интервал времени наблюдения автодинного сигнала.

При равноускоренном движении отражателя выражение для автодинного сигнала запишется в виде:

$$P(t) = \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{\lambda_0} \left(V_0 \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2}\right)\right). \quad (4)$$

При моделировании автодинного сигнала при равноускоренном движении отражателя использовались следующие параметры: длина волны излучения лазера  $\lambda_0 = 650$  нм, начальная скорость движения отражателя  $V_0 = 0$ , ускорение внешнего отражателя  $a = 2.6 \cdot 10^{-5}$  м/с<sup>2</sup>. Моделирование проводилось при продолжительности выборки времени  $t = 1$  с. Вид автодинного сигнала при таком равноускоренном движении отражателя приведен на рис. 1.

#### Моделирование спектра автодинного сигнала при равноускоренном движении отражателя

Предположим, что объект прямолинейно равномерно движется с постоянной скоростью  $\vartheta$  на участке наблюдения  $t$ . В этом случае зависимость времени обхода лазерным излучением внешнего резонатора от времени примет следующий вид:

$$\tau(t) = \frac{2}{c} (L_0 + \vartheta \cdot t). \quad (5)$$

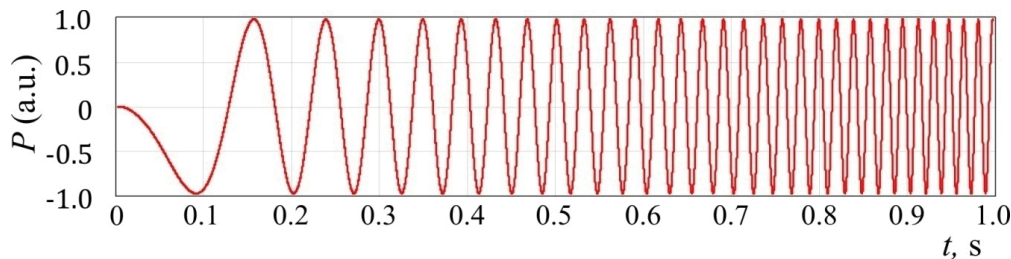


Рис. 1. Вид функции автодинного сигнала при равноускоренном движении внешнего отражателя с параметрами:  $\lambda_0 = 650$  нм,  $V_0 = 0$ ,  $a = 2.6 \cdot 10^{-5}$  м/с<sup>2</sup>,  $t = 1$  с

Fig. 1. The simulated self-mixing signal at uniformly accelerated movement of an external reflector with the parameters:  $\lambda_0 = 650$  нм,  $V_0 = 0$ ,  $a = 2.6 \cdot 10^{-5}$  м/с<sup>2</sup>,  $t = 1$  с



Тогда нормированную составляющую автодинного сигнала можно представить в виде:

$$P = \cos\left(\frac{2\omega_0}{c}(L_0 + \vartheta \cdot t)\right), \quad (6)$$

учитывая, что  $\omega_0 = 2\pi \cdot c/\lambda_0$ , получаем:

$$P = \cos\left(\frac{4\pi \cdot \vartheta \cdot t}{\lambda_0} + \frac{4\pi \cdot L_0}{\lambda_0}\right). \quad (7)$$

Сопоставляя полученное выражение (6) для переменной нормированной составляющей автодинного сигнала с гармонической функцией косинуса в виде:

$$P = \cos(\Omega \cdot t + \varepsilon), \quad (8)$$

где  $\varepsilon$  – начальная фаза, и учитывая, что  $\Omega = 2\pi \cdot \nu$ , где  $\nu$  – частота изменения автодинного сигнала при поступательном движении отражателя, получаем:

$$\nu = \frac{2 \cdot \vartheta}{\lambda_0}, \quad \varepsilon = \frac{4\pi \cdot L_0}{\lambda_0},$$

откуда

$$\vartheta = \nu \cdot \lambda_0 / 2. \quad (9)$$

То есть скорость движения внешнего отражателя можно получить, определив частоту переменной нормированной составляющей спектра автодинного сигнала с использованием выражения (9).

Для определения ускорения используем разность частот в начале  $\nu_{in}$  и конце  $\nu_{out}$  интервала наблюдения:

$$a = \frac{(\nu_{out} - \nu_{in}) \cdot \lambda_0}{2} \cdot t. \quad (10)$$

При разложении автодинного сигнала в ряд Фурье, за счет ограниченности времени наблюдения сигнала, результирующий спектр будет представлять собой свертку спектра автодинного сигнала с Фурье-образом прямоугольного окна. В этом случае за значение частот низкой частотной составляющей  $\nu_{in}$  и высокочастотной составляющей  $\nu_{out}$  следует принимать частоты, соответствующие середине подъема и спада, огибающей спектра.

На рис. 2 приведен спектр автодинного сигнала при равноускоренном движении отражателя для случая ненулевой начальной скорости движения отражателя  $\vartheta = 0.5 \cdot 10^{-5}$  м/с.

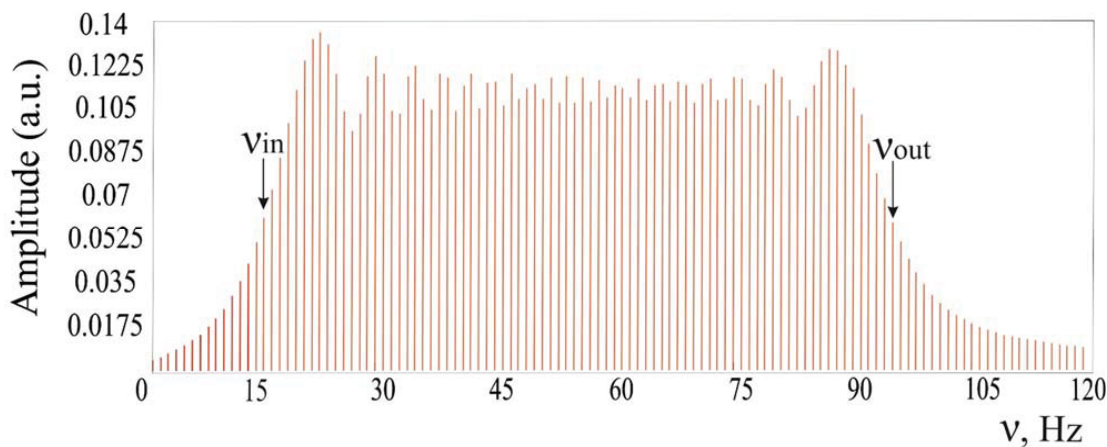


Рис. 2. Спектр автодинного сигнала при равноускоренном движении внешнего отражателя с параметрами:

$$\lambda_0 = 650 \text{ нм}, \vartheta = 0.5 \cdot 10^{-5}, a = 2.6 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2, t = 1 \text{ с}$$

Fig. 2. Spectrum of the self-mixing signal at uniformly accelerated movement of an external reflector with the parameters:  $\lambda_0 = 650 \text{ nm}, \vartheta = 0.5 \cdot 10^{-5}, a = 2.6 \cdot 10^{-5} \mu\text{m/s}^2, t = 1 \text{ s}$

Для случая движения отражателя с начальной скоростью  $V_0 = 0.5 \cdot 10^{-5}$  из спектра автодинного сигнала, приведенного на рис. 1, следует выбирать линии с частотами  $\nu_{out} = 96$  Гц и  $\nu_{in} = 15$  Гц. Разность в этом случае составляет  $\nu_{out} - \nu_{in} = 81$  Гц, а вычисленное из соотношения (10) значение составило величину  $a = 2.632 \cdot 10^{-5}$  м/с<sup>2</sup>. При этом погрешность составила 1.2%.

На рис. 3 приведены результаты моделирования зависимости частоты  $\nu_{out}$  от величины ускорения при нулевой начальной скорости движения объекта.

Как видно из рис. 3, для распространенного случая движения объекта с нулевой начальной скоростью наблюдается линейная зависимость высокочастотной составляющей спектра автодинного сигнала  $\nu_{out}$  от величины ускорения.

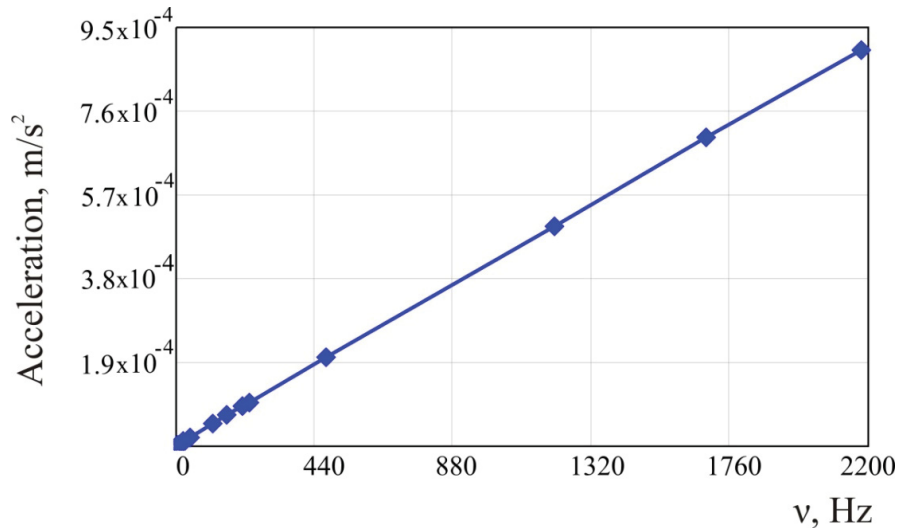


Рис. 3. Зависимость частоты  $v_{out}$  от величины ускорения при нулевой начальной скорости движения объекта

Fig. 3. Dependence of the frequency  $v_{out}$  on acceleration at zero initial velocity of the object

Компьютерное моделирование влияния 3%-ной шумовой составляющей, накладываемой с помощью *rnd* функции на автодинный сигнал при различных начальных скоростях, приводит к величине среднего квадратического отклонения ускорения, равного  $\sim 1\%$ . Разрешение предлагаемого метода оценивалось по измене-

нию частот соседних спектральных составляющих и составило  $500 \text{ nm/c}^2$ .

#### Экспериментальная часть

Измерения проводились на установке, блок-схема которой представлена на рис. 4. В состав установки входили полупроводниковый авто-

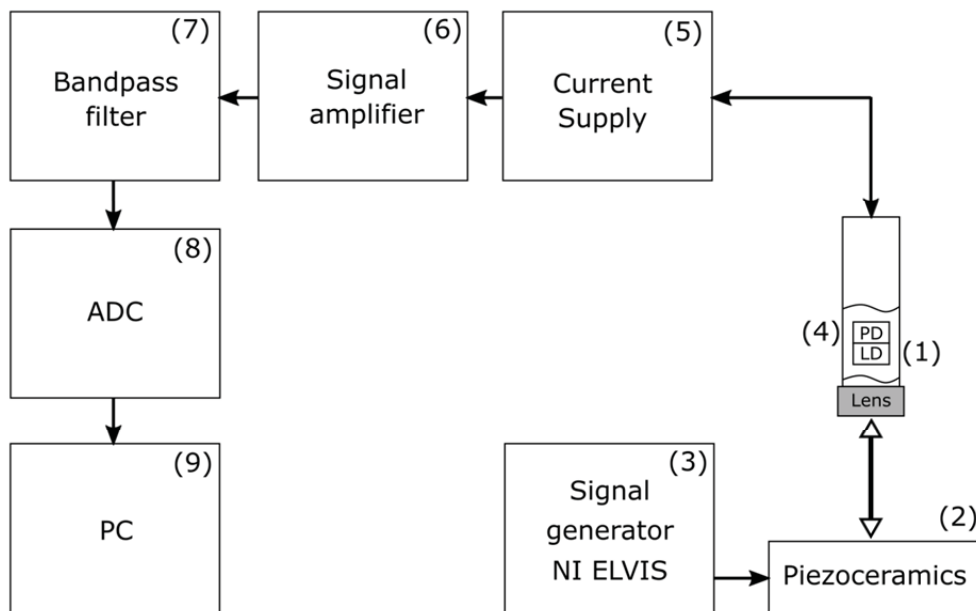


Рис. 4. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – лазерной автодин, 2 – пьезокерамика, 3 – генератор сигналов NIELVIS, 4 – фотоприемник, 5 – блок управления током питания, 6 – усилитель сигнала, 7 – полосовой фильтр, 8 – АЦП, 9 – компьютер

Fig. 4. Block-diagram of the experimental setup: 1 – self-mixing laser, 2 – piezoceramics, 3 – signal generator NIELVIS, 4 – photo detector, 5 – current supply control unit, 6 – signal amplifier, 7 – band-pass filter, 8 – analog-to-digital converter, 9 – computer



дин  $I$  на лазерном диоде HLDP 650a с длиной волны 654 нм. Излучение лазерного автодина фокусировалось на поверхность пьезокерамики 2, при этом диаметр пятна лазерного излучения на поверхности объекта составлял 1 мм. Ускоренное движение отражателя осуществлялось с помощью генератора сигналов, встроенного в лабораторную станцию виртуальных приборов NIELVIS 3. Рабочий режим тока питания лазерного диода задавался блоком управления током питания 5.

Отраженное от внешнего отражателя излучение направлялось в резонатор лазера, изменение мощности которого фиксировалось фотоприемником 4. Продетектированный с фотоприемника сигнал проходил через усилитель сигнала 6, фильтр переменного сигнала 7 и поступал на вход аналого-цифрового преобразователя 8 (с частотой дискретизации 100 кГц), соединенного с компьютером 9. Изменение ускорения задавалось изменением напряжения, прикладываемого к пьезокерамике.

Излучение лазерного диода фокусировалось линзой (Lens) с числовой апертурой  $NA=0.25$ . Отражатель располагался в плоскости фокусировки лазерного пучка. Как известно, максимальный

коэффициент автодинного усиления лежит вблизи пороговых значений тока питания полупроводникового лазера. В связи с этим ток питания лазерного автодина задавался на уровне 1.2 от значения порогового тока ( $I_{th} = 25$  мА), при этом мощность излучения лазерного диода уменьшалась до 2 мВт при рабочей мощности 5 мВт.

Для уменьшения уровня обратной связи использовалась регулируемая расфокусировка пучка лазера. Используя наборы различных спектральных составляющих автодинного сигнала, определяли уровень обратной связи, который во время измерений не превышал значений  $C < 0.15$ .

На рис. 5 приведены измеренный автодинный сигнал (а) и его спектр (б) для случая развертки напряжения по квадратичному закону в диапазоне от 0 до 1 В за время 50 мс. По достижению максимального ускорения развертка напряжения на пьезокерамике задавалась в сторону уменьшения опять по квадратичному закону до достижения нулевого значения. Для увеличения точности измерений циклы изменения развертки напряжения повторялись пять раз.

Измеренное значение частоты  $\nu_{out}$  составило 400 Гц, а вычисленное ускорение  $-a = 26 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$ .

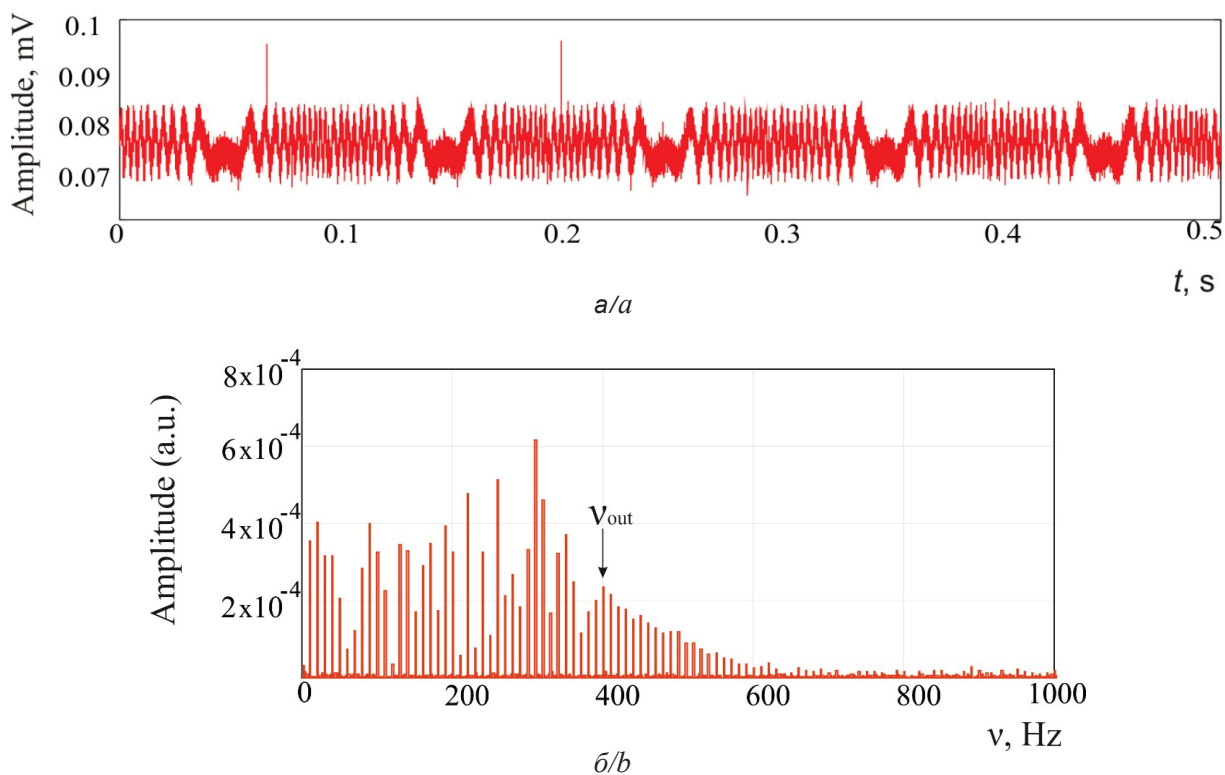


Рис. 5. Автодинный сигнал (а) и его спектр (б) для случая развертки напряжения в диапазоне от 0 до 1 В с пятикратным повторением

Fig. 5. The self-mixing signal (a) and its spectrum (b) in the case of a voltage sweep in the range from 0 to 1 V with fivefold repetition





### Заключение

При использовании лазерных автодинов предложенный метод измерения ускорения реализуется как фазовый метод, что позволяет избежать необходимости проведения калибровки при таких измерениях. В качестве калибровочной величины используется длина волны лазерного излучения, с которой и сравниваются величины смещений при движении объекта с ускорением.

Традиционные методы измерения ускорения по изменению положения экстремумов на временной оси, а также методы, основанные на использовании наименьших квадратов и вейвлет анализа, требуют значительных усилий по обработке сигнала: фильтрации и выделения экстремумов и, кроме того, значительного времени для обработки автодинного сигнала. В предлагаемом методе измерения ускорения по спектру автодинного сигнала используется хорошо зарекомендовавший себя алгоритм быстрого дискретного преобразования Фурье, который широко используется для обработки сигналов сложной формы.

Нами показано, что для наиболее распространенного случая движения объекта с нулевой начальной скоростью наблюдается линейная зависимость спектральной составляющей  $v_{out}$  в конце интервала наблюдения от величины ускорения. Предлагаемый метод при использовании в качестве источника излучения лазера с длиной волны 650 нм позволяет определять ускорения величиной свыше 1 мкм/с<sup>2</sup>.

Приведены результаты измерения движения пьезокерамики с ускорением, задаваемым квадратичным законом изменения напряжения на ней. Представлены результаты расчета ускорения по спектру автодинного сигнала для случая  $a = 26$  мкм/с<sup>2</sup>. Показана линейная зависимость ускорения отражателя от частоты измеряемой спектральной составляющей автодинного сигнала.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 8.7628.2017) и Российского научного фонда (проект № 19-79-00122).

### Список литературы

1. Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T. Laser diode self-mixing technique for sensing applications // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2002. Vol. 4, iss. 6. P. 283–294.
2. Norgia M., Donati S. A displacement-measuring instrument utilizing self-mixing interferometry // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2003. Vol. 52, iss. 6. P. 1765–1770.
3. Wang Y., Xie F., Ma S., Dong L. Review of surface profile measurement techniques based on optical interferometry // Opt. Lasers Eng. 2017. Vol. 93. P. 164–170.
4. Gouaux F., Servagent N., Bosch T. Absolute distance measurement with an optical feedback interferometer // Appl. Opt. 1998. Vol. 37, iss. 28. P. 6684–6689. DOI: 10.1364/AO.37.006684
5. Guo D., Wang M. Self-mixing interferometry based on a double modulation technique for absolute distance measurement // Appl. Opt. 2007. Vol. 46, iss. 9. P. 1486–1491.
6. Reza S. A., Khwaja T. S., Mazhar M. A., Niazi H. K., Nawab R. Improved laser-based triangulation sensor with enhanced range and resolution through adaptive optics-based active beam control // Appl. Opt. 2017. Vol. 56, iss. 21. P. 5996–6006.
7. Zhong J., Zhang X., Ju Z. Absolute small-angle measurement based on optical feedback interferometry // Opt. Lett. 2008. Vol. 33, iss. 6. P. 830–832.
8. Yang B., Wang D., Zhou L., Wu S., Xiang R., Zhana W., Gui H., Liu J., Wang H., Benli Y. An ultra-small-angle self-mixing sensor system with high detection resolution and wide measurement range // Optics & Laser Technology. 2017. Vol. 91. P. 92–97. DOI: 10.1016/j.optlastec.2016.11.024
9. Donati S. Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements // Laser Photonics Rev. 2012. Vol. 6, iss. 3. P. 393–417. DOI: 10.1002/lpor.201100002
10. Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Измерение микро- и нановибраций и перемещений с использованием полупроводниковых лазерных автодинов // Квант. электроника. 2011. Т. 41, вып. 1. С. 86–94.
11. Zhu W., Chen Q., Wang Y., Luo H., Wu H., Ma B. Improvement on vibration measurement performance of laser self-mixing interference by using a pre-feedback mirror // Opt. Lasers Eng. 2018. Vol. 105. P. 150–158.
12. Sels S., Ribbens B., Bogaerts B., Peeters J. 3D model assisted fully automated scanning laser Doppler vibrometer measurements // Opt. Lasers Eng. 2017. Vol. 99. P. 22–30.
13. Guo D., Shi L., Yu Y., Xia W., Wang M. Micro-displacement reconstruction using a laser self-mixing grating interferometer with multiple-diffraction // Optics Express. 2017. Vol. 25, iss. 25. P. 31394–31406. DOI: 10.1364/OE.25.031394
14. Xu J., Huang L., Yin S., Bingkun G., Chen P. All-fiber self-mixing interferometer for displacement measurement based on the quadrature demodulation technique // Opt. Rev. 2018. Vol. 25, iss. 1. P. 40–45.
15. Scalise L., Yu Y. G., Giuliani G., Plantier G., Bosch T. Self-mixing laser diode velocimetry: Application to vibration and velocity measurement // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2004. Vol. 53, iss. 1. P. 223–232.
16. Lin H., Chen J., Xia W., Hao H., Guo D., Wang M. Enhanced self-mixing Doppler velocimetry by fiber Bragg grating // Opt. Eng. 2018. Vol. 57, iss. 5. P. 051504. DOI: 10.1117/1.OE.57.5.051504



17. Усанов Д. А., Скрипаль Ан. В., Добдин С. Ю. Определение ускорения при неравномерно ускоренных микро- и наносмещениях объекта по автодинному сигналу полупроводникового лазера // Нано- и микро-системная техника. 2010. № 10. С. 51–54.
18. Zabit U., Bernal O. D., Bosch T. Design and Analysis of an Embedded Accelerometer Coupled Self-Mixing Laser Displacement Sensor // IEEE Sensors Journal. 2013. Vol. 13, iss. 6. P. 2200–2207. DOI: 10.1109/jsen.2013.2251626
19. Yang Y., Li X., Kou K., Zhang L. Optical accelerometer design based on laser self-mixing interference // Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9369. 93690R. DOI: 10.1117/12.2076463
20. Guo D., Jiang H., Shi L., Wang M. Lasere Self-Mixing Grating Interferometer for MEMS Accelerometer Testing // IEEE Photonics Journal. 2018. Vol. 10, iss. 1, № 6800609. DOI: 10.1109/JPHOT.2018.2792447
21. Du Y. J., Yang T. T., Gong D. D., Wang Y. C., Sun X. Y., Qin F., Dai G. High Dynamic Micro Vibrator with Integrated Optical Displacement Detector for In-Situ Self-Calibration of MEMS Inertial Sensors // Sensors. 2018. Vol. 18, iss. 7. 2055. DOI: 10.3390/s18072055
22. Мокров Е. А., Папко А. А. Акселерометры НИИ Физических измерений – элементы микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2002. № 1. С. 3–9.
23. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Кащавцев Е. О., Добдин С. Ю. Определение ускорения при микро- и наносмещениях объекта по автодинному сигналу полупроводникового лазера с учетом влияния внешней оптической обратной связи // ЖТФ. 2013. Т. 83, вып. 7. С. 156–158.
24. Чанилов О. И., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Камышанский А. С. Вейвлет-анализ лазерного интерференционного сигнала при ударном возбуждении отражателя // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31, № 21. С. 9–16.
25. Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Полупроводниковые лазерные автодины для измерения параметров движения при микро- и наносмещениях. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2014. 136 с.
26. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Камышанский А. С. Измерение скорости нанометровых перемещений по спектру автодинного сигнала лазера на квантово-размерных структурах // Письма в ЖТФ. 2004. № 7. С. 77–82.
27. Alexandrova A. S., Tzoganis V., Welsch C. P. Laser diode self-mixing interferometry for velocity measurements // Opt. Eng. 2015. Vol. 54, iss. 3. 034104. DOI: 10.1117/1.oe.54.3.034104
28. Li D., Huang Z., Mo W., Ling Y., Zhang Z., Huang Z. Equivalent wavelength self-mixing interference vibration measurements based on envelope extraction Fourier transform algorithm // Appl. Opt. 2017. Vol. 56, iss. 31. P. 8584–8591. DOI: 10.1364/AO.56.008584
29. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Астахов Е. И., Добдин С. Ю. Лазерная автодинная регистрация наноперемещений при модуляции длины волны лазерного излучения // Квант. электроника. 2018. Т. 48, вып. 6. С. 577–581. DOI: 10.1070/QEL16460
30. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Добдин С. Ю., Астахов Е. И., Костюченко И. Ю., Джафаров А. В. Методы автодинной интерферометрии расстояния при токовой частотной модуляции полупроводникового лазера // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2018. Т. 18, вып. 3. С. 189–201. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-3-189-201
31. Lenstra D., Verbeek B. H., den Boef A. J. Coherence collapse in single-mode semiconductor laser due to optical feedback // IEEE J. Quantum Electronics. 1985. Vol. QE-21. P. 674–679.
32. Sigg J. Effects of optical feedback on the Light-Current characteristics of semiconductor lasers // IEEE J. Quantum Electronics. 1993. Vol. QE-29. P. 1262–1270.

#### Образец для цитирования:

Скрипаль Ан. В., Добдин С. Ю., Джафаров А. В., Садчикова К. А., Дубровская И. А. Интерферометрия ускорения по спектру автодинного сигнала полупроводникового лазера // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2019. Т. 19, вып. 4. С. 279–287. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-4-279-287>

#### Method for Measuring Acceleration by the Spectrum of Self-Mixing Signal of Semiconductor Laser

Ан. В. Скрипаль, С. Ю. Добдин, А. В. Джафаров, К. А. Садчикова, И. А. Дубровская

Anatoly V. Skripal, <https://orcid.org/0000-0002-9080-0057>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, skripalav@info.sgu.ru

Sergey Yu. Dobdin, <https://orcid.org/0000-0002-0801-4664>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, dobbinsy@info.sgu.ru

Aleksey V. Dzharafarov, <https://orcid.org/0000-0002-0588-3151>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, jafaralex@mail.ru

Karina A. Sadchikova, <https://orcid.org/0000-0002-3153-1301>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, karinam94@mail.ru

Irina A. Dubrovskaya, <https://orcid.org/0000-0001-6466-4592>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, irinadubrovskaya@mail.ru

**Background and Objectives:** Traditional methods for measuring the acceleration by changing the position of extremums on the time



axis, as well as methods based on the use of least squares and wavelet analysis, require significant signal processing efforts: filtering and allocating extremums or significant time for processing an autodyne signal. The proposed method for measuring the acceleration of the spectrum of the self-mixing signal uses a well-established machine method of Fourier analysis, which is widely used for processing complex waveforms. **Materials and Methods:** The self-mixing signal spectrum has been simulated at the uniformly accelerated movement of the reflector. The interconnections of the low-frequency and high-frequency components of the self-mixing signal spectrum have been shown. The cases of measuring the uniformly accelerated object motion along the spectrum of a self-mixing signal have been experimentally implemented. Accelerated movement of the reflector was carried out using signal generators embed into the laboratory station of virtual instruments NI ELVIS. The results of measuring the motion of piezoceramics with acceleration are given, which are specified by the quadratic law of the change in voltage. **Results:** For the most common case of moving an object at zero initial velocity, a linear dependence of the high-frequency spectral component at the end of the observation interval on the acceleration has been observed. The proposed method, when used as a laser radiation source with a wavelength of 650 nm, allows to determine accelerations exceeding  $1 \mu\text{m/s}^2$ . The results of calculating the acceleration from the self-mixing signal spectrum for the case of  $a = 26 \mu\text{m/s}^2$  have been shown. **Conclusion:** The method of acceleration measurement based on Fourier analysis of laser autodyne interference signal has been proposed. The resolution of the proposed method has been evaluated by changing the frequency of the spectral component per unit and amounted to  $500 \text{ nm/s}^2$ .

**Keywords:** laser interferometry, self-mixing laser, Fourier spectrum, acceleration measurement, self-mixing signal spectrum.

Received: 20.07.2019 / Accepted: 16.09.2019 / Published: 02.12.2019

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

**Acknowledgements:** This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project No. 8.7628.2017) and the Russian Science Foundation (project No. 19-79-00122).

## References

1. Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T. Laser diode self-mixing technique for sensing applications. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2002, vol. 4, iss. 6, pp. 283–294.
2. Norgia M., Donati S. A displacement-measuring instrument utilizing self-mixing interferometry. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2003, vol. 52, iss. 6, pp. 1765–1770.
3. Wang Y., Xie F., Ma S., Dong L. Review of surface profile measurement techniques based on optical interferometry. *Opt. Lasers Eng.*, 2017, vol. 93, pp. 164–170.
4. Gouaux F., Servagent N., Bosch T. Absolute distance measurement with an optical feedback interferometer. *Appl. Opt.*, 1998, vol. 37, iss. 28, pp. 6684–6689. DOI: 10.1364/AO.37.006684
5. Guo D., Wang M. Self-mixing interferometry based on a double modulation technique for absolute distance measurement. *Appl. Opt.*, 2007, vol. 46, iss. 9, pp. 1486–1491.
6. Reza S. A., Khwaja T. S., Mazhar M. A., Niazi H. K., Nawab R. Improved laser-based triangulation sensor with enhanced range and resolution through adaptive optics-based active beam control. *Appl. Opt.*, 2017, vol. 56, iss. 21, pp. 5996–6006.
7. Zhong J., Zhang X., Ju Z. Absolute small-angle measurement based on optical feedback interferometry. *Opt. Lett.*, 2008, vol. 6, pp. 830–832.
8. Yang B., Wang D., Zhou L., Wu S., Xiang R., Zhana W., Gui H., Liu J., Wang H., Benli Y. An ultra-small-angle self-mixing sensor system with high detection resolution and wide measurement range. *Optics & Laser Technology*, 2017, vol. 91, pp. 92–97. DOI: 10.1016/j.optlastec.2016.11.024
9. Donati S. Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements. *Laser Photonics Rev.*, 2012, vol. 6, iss. 3, pp. 393–417. DOI: 10.1002/lpor.201100002
10. Usanov D. A., Skripal A. V. Measurement of micro- and nanovibrations and displacements using semiconductor laser autodynes. *Quantum Electronics*, 2011, vol. 41, iss. 1, pp. 86–94 (in Russian).
11. Zhu W., Chen Q., Wang Y., Luo H., Wu H., Ma B. Improvement on vibration measurement performance of laser self-mixing interference by using a pre-feedback mirror. *Opt. Lasers Eng.*, 2018, vol. 105, pp. 150–158.
12. Sels S., Ribbens B., Bogaerts B., Peeters J. 3D model assisted fully automated scanning laser Doppler vibrometer measurements. *Opt. Lasers Eng.*, 2017, vol. 99, pp. 22–30.
13. Guo D., Shi L., Yu Y., Xia W., Wang M. Micro-displacement reconstruction using a laser self-mixing grating interferometer with multiple-diffraction. *Optics Express*, 2017, vol. 25, iss. 25, pp. 31394–31406. DOI: 10.1364/OE.25.031394
14. Xu J., Huang L., Yin S., Bingkun G., Chen P. All-fiber self-mixing interferometer for displacement measurement based on the quadrature demodulation technique. *Opt. Rev.*, 2018, vol. 25, iss. 1, pp. 40–45.
15. Scalise L., Yu Y. G., Giuliani G., Plantier G., Bosch T. Self-mixing laser diode velocimetry: Application to vibration and velocity measurement. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2004, vol. 53, iss. 1, pp. 223–232.
16. Lin H., Chen J., Xia W., Hao H., Guo D., Wang M. Enhanced self-mixing Doppler velocimetry by fiber Bragg grating. *Opt. Eng.*, 2018, vol. 57, iss. 5, 051504. DOI: 10.1117/1.OE.57.5.051504
17. Usanov D. A., Skripal An. V., Dobdin S. Yu. The Acceleration Determination at Unevenly Accelerated at Microand Nanodisplacements by the Autodyne Signal of Semiconductor Laser. *Journal of Nano- and Microsystem Technique*, 2010, no. 10, pp. 51–54 (in Russian).
18. Zabit U., Bernal O. D., Bosch T. Design and Analysis of an Embedded Accelerometer Coupled Self-Mixing Laser Displacement Sensor. *IEEE Sensors Journal*, 2013, vol. 13, iss. 6, pp. 2200–2207. DOI: 10.1109/jsen.2013.2251626





19. Yang Y., Li X., Kou K., Zhang L. Optical accelerometer design based on laser self-mixing interference. *Proc. of SPIE*, 2015, vol. 9369, 93690R. DOI: 10.1117/12.2076463
20. Guo D., Jiang H., Shi L., Wang M. Laser Self-Mixing Grating Interferometer for MEMS Accelerometer Testing. *IEEE Photonics Journal*, 2018, vol. 10, iss. 1, no. 6800609. DOI: 10.1109/JPHOT.2018.2792447
21. Du Y. J., Yang T. T., Gong D. D., Wang Y. C., Sun X. Y., Qin F., Dai G. High Dynamic Micro Vibrator with Integrated Optical Displacement Detector for In-Situ Self-Calibration of MEMS Inertial Sensors. *Sensors*, 2018, vol. 18, iss. 7, 2055. DOI: 10.3390/s18072055
22. Mokrov E. A., Papko A. A. Accelerometers by Institute of Physical Measurements Devices of Microsystems Engineering. *Journal of Nano- and Microsystem Technique*, 2002, no. 1, pp. 3–9 (in Russian).
23. Usanov D. A., Skripal A. V., Kashchavtsev E. O., Dobdin S. Yu. Acceleration measurements upon micro- and nanodisplacements of an object using the autodyne signal of a semiconductor laser with allowance for the external optical feedback. *Tech. Phys.*, 2013, vol. 83, iss. 7, pp. 156–158 (in Russian).
24. Chanilov O. I., Usanov D. A., Skripal A. V., Kamyshansky A. S. Wavelet analysis of a laser interference signal measured upon impact excitation of the reflector. *Tech. Phys. Lett.*, 2005, vol. 31, no. 21, pp. 9–16 (in Russian).
25. Usanov D. A., Skripal A. V. *Poluprovodnikovye lazernye avtodiny dlia izmereniia parametrov dvizheniia primikro-i nano smeshcheniakh* [Semiconductor Laser Autodyne for Measuring Motion Parameters at Micro- and Nano-Displacements]. Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 2014, 136 p. (in Russian).
26. Usanov D. A., Skripal A. V., Kamyshansky A. S. Velocities of nanometer-scale displacements determined using the autodyne signal spectrum of a quantum-confined semiconductor structure laser. *Tech. Phys. Lett.*, 2004, no. 7, pp. 77–82 (in Russian).
27. Alexandrova A. S., Tzoganis V., Welsch C. P. Laser diode self-mixing interferometry for velocity measurements. *Opt. Eng.*, 2015, vol. 54, iss. 3, 034104. DOI: 10.1117/1.oe.54.3.034104
28. Li D., Huang Z., Mo W., Ling Y., Zhang Z., Huang Z. Equivalent wavelength self-mixing interference vibration measurements based on envelope extraction Fourier transform algorithm. *Appl. Opt.*, 2017, vol. 56, iss. 31, pp. 8584–8591. DOI: 10.1364/AO.56.008584
29. Usanov D. A., Skripal A. V., Astakhov E. I., Dobdin S. Yu. Laser autodyne registration of nanodisplacements under laser wavelength modulation. *Quantum Electronics*, 2018, vol. 48, iss. 6, pp. 577–581 (in Russian). DOI: 10.1070/QEL16460
30. Usanov D. A., Skripal An. V., Dobdin S. Yu., Astakhov E. I., Kostuchenko I. S., Dzhafarov A. V. Methods of Autodyne Interferometry of the Distance by Injected Current Modulation of a Semiconductor Laser. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 3, pp. 189–201 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-3-189-201
31. Lenstra D., Verbeek B. H., den Boef A. J. Coherence collapse in single-mode semiconductor laser due to optical feedback. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1985, vol. QE-21, pp. 674–679.
32. Sigg J. Effects of optical feedback on the Light-Current characteristics of semiconductor lasers. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1993, vol. QE-29, pp. 1262–1270.

**Cite this article as:**

Skripal An. V., Dobdin S. Yu., Dzhafarov A. V., Sadchikova K. A., Dubrovskaja I. A. Method for Measuring Acceleration by the Spectrum of Self-Mixing Signal of Semiconductor Laser. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2019, vol. 19, iss. 4, pp. 279–287 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-4-279-287>