

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-609-616

УДК 51-74, 534.08, 535.231.6

Методика оценки чувствительности к вибрации оптических компонентов, основанная на вейвлет-анализе вибрационно-модулированного излучения

Роман Михайлович Смертин¹✉, Илларион Леонидович Никулин²

¹ Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, 614990, Российская Федерация

^{1,2} Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, 614990, Российская Федерация

¹ romsmerm@gmail.com✉, <https://orcid.org/0009-0002-7329-9413>

² nil@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8496-7942>

Аннотация

Введение. Вибрации навигационных систем, в частности, волоконно-оптических гироскопов, влияют на интенсивность излучения, проходящего через их оптические компоненты. Это приводит к погрешности позиционирования транспортных средств. На данный момент механизм влияния вибраций на волоконно-оптические гироскопы и причины их высокой вибрационной чувствительности не до конца изучены. В настоящей работе исследована амплитудная модуляция оптического сигнала, вызванная вибрацией пассивных оптических компонентов. **Метод.** Методика оценки чувствительности к вибрации включает регистрацию на экспериментальном стенде излучения, проходящего через оптические компоненты при их колебаниях с частотой от 20 до 2000 Гц и амплитудой 5 г. Алгоритм обработки результатов измерений основан на вейвлет-преобразовании, а также быстрым преобразованием Фурье и обеспечивает поиск и оценку вызванной вибрацией амплитудной модуляции проходящего излучения. **Основные результаты.** Приведены типичные случаи временной развертки сигналов, проходящих через оптические компоненты. Показано влияние вибрации на излучение. Обнаружена модуляция оптического сигнала, прошедшего через Y-разветвители различных производителей, которая проявляется как в виде периодического изменения измеряемой мощности излучения, так и в виде изменения коэффициента деления. Приведен алгоритм, позволяющий проводить ускоренный анализ за счет рационального отбора данных для последующего вейвлет-анализа. **Обсуждение.** Предложенная методика исследования модуляции на основе вейвлет-анализа позволяет оценить чувствительность оптических компонентов к вибрации, выделить резонансные частоты для Y-разветвителей. Предложенный программный комплекс позволяет определять модуляцию, составляющую менее 0,1 % от начальной мощности.

Ключевые слова

постобработка сигнала, метод сканирующей частоты, быстрое преобразование Фурье, оптические разветвители, вибрация, модуляция мощности

Ссылка для цитирования: Смертин Р.М., Никулин И.Л. Методика оценки чувствительности к вибрации оптических компонентов, основанная на вейвлет-анализе вибрационно-модулированного излучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 609–616. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-609-616

Methodology for estimation of sensitivity to vibration of optical components based on wavelet analysis of vibration-modulated radiation

Roman M. Smertin¹✉, Illarion L. Nikulin²

¹ Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company (PAO PNPPK), Perm, 614990, Russian Federation

^{1,2} Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation

¹ romsmerm@gmail.com✉, <https://orcid.org/0009-0002-7329-9413>

² nil@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8496-7942>

© Смертин Р.М., Никулин И.Л., 2025

Abstract

The vibrations of navigation systems, including fiber optic gyroscopes, affect the intensity of radiation passing through their optical components. This can lead to positioning errors in vehicles. The mechanism by which vibrations influence fiber optic gyroscopes and the reasons for their high vibration sensitivity are still not fully understood. This paper investigates the amplitude modulation of the optical signal caused by the vibration of passive optical components. The sensitivity to vibration is evaluated by registering optical power passing through components on an experimental stand while they vibrate at frequencies between 20 and 2000 Hz with amplitude of 5 g. The measurement results are processed using a wavelet transform and fast Fourier transform algorithm. The algorithm estimates and searches for vibration-induced modulation of transmitted radiation. Typical cases of the time sweep of signals passing through optical components are presented. The influence of vibration on transmitted radiation is demonstrated. Modulation of the optical signal passing through Y-splitters from different manufacturers is detected, manifesting as periodic changes in the measured radiation power and changes in the split ratio. An algorithm is presented that enables accelerated analysis by selecting data rationally for subsequent wavelet analysis. The proposed methodology for analyzing modulation based on wavelet analysis enables the sensitivity of optical components to vibration to be estimated and resonant frequencies for Y-splitters to be selected. This methodology enables the identification of modulation levels below 0.1 % of the initial power.

Keywords

signal post-processing, frequency scanning method, fast Fourier transform, optical splitters, vibration, power modulation

For citation: Smertin R.M., Nikulin I.L. Methodology for estimation of sensitivity to vibration of optical components based on wavelet analysis of vibration-modulated radiation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 609–616 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-609-616

Введение

Широкое применение волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) в навигационных системах воздушных, водных и наземных транспортных средств способствует развитию и приводит к повышению требований к точности и надежности таких систем. Одной из причин чувствительности навигационных систем к вибрации, оказывающей неустранимое вредное воздействие и приводящей к снижению точности показаний, считается то, что само оптическое волокно является датчиком вибрации [1–3]. В связи с этим снижение чувствительности ВОГ к вибрации является актуальной задачей исследования. Причем наиболее простые методы снижения вибровосприимчивости, связанные с увеличением массы или габаритов системы [4, 5], в случае летательных аппаратов обычно не применимы.

В работах [6–8] исследована проблема вибрационного смещения показаний ВОГ. В работе [6] доказано, что ошибка возникает из-за изменения характеристик оптического волокна в результате возникающих от вибрации механических напряжений. В работах [7, 8] показано, что изменения оптической мощности излучения от источника, вызванные вибрацией, могут приводить к значительному смещению измеряемой угловой скорости и ошибкам навигации. Кроме источника излучения (активного компонента), вызванная вибрацией модуляция мощности в пассивных компонентах также может привести к ошибкам. В настоящее время механизм влияния вибраций на ВОГ и причины его высокой вибровосприимчивости не до конца изучены. В доступных научных работах не представлены методики измерения и обработки сигнала, позволяющие количественно оценить чувствительность к вибрации оптических компонентов ВОГ.

Целью настоящей работы является разработка методики количественной оценки влияния вибрации на характеристики отдельных оптических компонентов, а также ее апробация.

В работе приведено описание разработанного экспериментального стенда, позволяющего создавать вибрацию различной частоты отдельных компонентов ВОГ, а также регистрировать мощность излучения, проходящего через оптические компоненты. На основе предложенной методики обработки сигнала разработан программный комплекс обработки экспериментальных данных, позволяющий выявлять частоты, при которых вибрация приводит к изменению характеристик оптических компонентов.

Методика исследования

Выполнено исследование амплитудной модуляции сигнала, вызванной вибрацией — периодическое изменение оптических характеристик, например коэффициента деления Y-разветвителя, с частотой, близкой к частоте воздействия или кратной ей.

Предлагаемая методика оценки чувствительности к вибрации заключается в следующем. На первом этапе на измерительном стенде формируется массив данных мощности проходящего через оптические компоненты излучения при различных частотах вибрационного воздействия. На втором этапе с помощью программного комплекса происходит постобработка полученного массива и выявляются диапазоны частот, в которых изменения характеристик оптических компонентов превышают допустимые значения.

Измерительный стенд. Для исследования влияния вибрации разработан и реализован испытательный стенд, схема которого представлена на рис. 1. Излучение от источника 1 поступает на разветвитель 2, где делится на четыре канала: первый канал — опорный, нужен для выявления изменения интенсивности излучения от источника. Излучение со следующих трех каналов подается на испытуемые образцы 3, установленные на вибростенд 4. В качестве образцов использованы Y-разветвители с коэффициентом

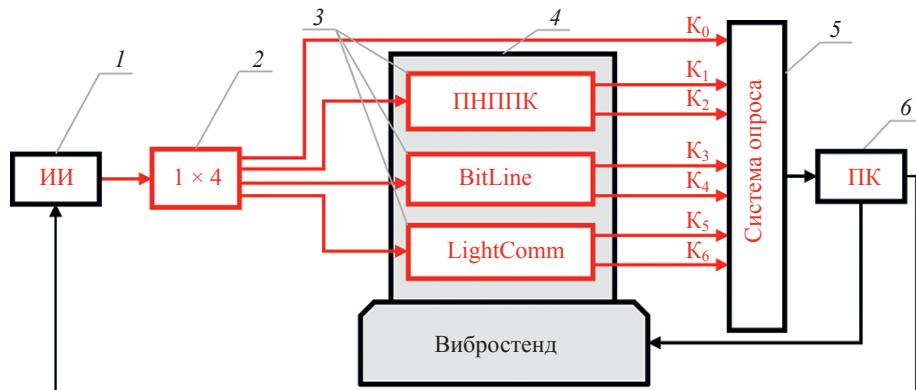


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — источник излучения (ИИ) 1550 нм; 2 — оптический разветвитель 1 × 4; 3 — испытуемые образцы; 4 — вибростенд; 5 — измеритель оптической мощности; 6 — персональный компьютер (ПК); K₀...K₆ — измерительные каналы (K₀ — опорный)

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup: 1 — optical source (1550 nm); 2 — optical splitter 1 × 4; 3 — test samples; 4 — vibration test bench; 5 — optical power meter; 6 — personal computer. K₀...K₆ measuring channels (K₀ — reference)

деления 50/50, производимые компаниями ПНППК¹, BitLine² и LightComm³. Разделенные на каждом образце сигналы, а также опорный сигнал, поступают на многоканальный измеритель мощности 5, результаты измерения мощности записываются и обрабатываются на персональном компьютере 6.

Немодулированный оптический сигнал пропускается через разветвители, на которые оказывается вибрационное воздействие. Мощность прошедшего излучения регистрируется и записывается измерителем оптической мощности с частотой опроса $F_{\text{опр}} = 20$ кГц. В испытании используется метод сканирующей частоты: частоты воздействия $F_{\text{вн}}$ изменяются от 20 Гц до 2000 Гц с виброускорением $a = 5$ г. Такой диапазон выбран в соответствие с требованиями, близкими к стандартам NASA⁴. Частота вибрации определяется времененным профилем $F_{\text{вн}}(t)$ (рис. 2). Разностный сигнал мощности $\Delta P_i(t)$ записывается непрерывно.

Программный комплекс. Обработка экспериментальных данных реализована в пакете прикладных программ MATLAB с использованием его специализированных функций.

Алгоритм постобработки состоит в следующем. Сначала к полученным данным применяется процедура согласования мощностей, которая заключается в вычитании мощности нормированного опорного пучка:

$$\Delta P_i(t) = P_i(t) - P_o(t) \frac{P_{i,t=0}}{P_{o,t=0}}, \quad (1)$$

где $\Delta P_i(t)$ — разность мощностей i -го и опорного каналов; $P_i(t)$ — сигнал с объекта, подвергнутого воздействию; $P_o(t)$ — опорный сигнал; $P_{i,t=0}$ и $P_{o,t=0}$ — сигна-

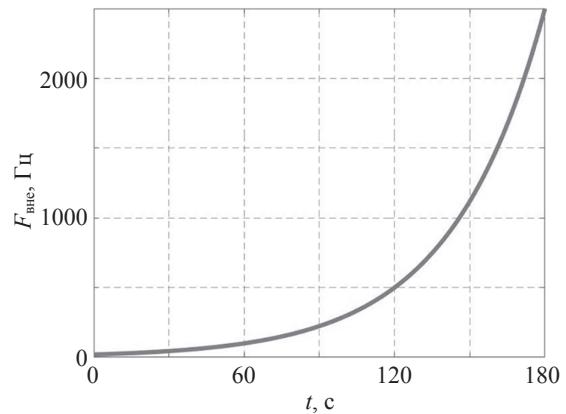


Рис. 2. Зависимость частоты вибрации $F_{\text{вн}}$ от времени t
Fig. 2. Dependence of vibration frequency $F_{\text{вн}}$ vs. time t

лы, полученные без вибрации. Множитель $P_{i,t=0}/P_{o,t=0}$ обеспечивает соответствие масштабов.

Полученные временные зависимости $\Delta P_i(t)$ разбиваются на интервалы конечной ширины $\Delta t'$, $t \in [t'; t' + \Delta t']$ шириной $\Delta t' = 1$ с. К этим интервалам применяется быстрое преобразование Фурье, выполненное на основе работы [9] с помощью функции FFT (Fast Fourier Transform) прикладного программного обеспечения MATLAB.

Быстрое преобразование Фурье применяется к небольшим временным интервалам $\Delta t' = 1$ с, в которых изменение частоты вибрации достаточно мало. Такое деление позволяет считать, что сигнал в каждом интервале близок к статичному по частоте. В каждом интервале производится поиск модуляции $\Delta P_i(t)$. Участок считается модулированным в случае превышения заранее определенного порога. В настоящей работе зависимость порога от частоты аппроксимирована экспонентой, так как шум мощности имел низкочастотный характер.

Для детального исследования к интервалам, где вероятна модуляция сигнала, применен вейвлет-анализ [10–16], который выполнен посредством функции CWT (Continuous Wavelet Transform) пакета MATLAB

¹ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.pnppk.com> (дата обращения: 15.12.2024).

² [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.oemarket.com> (дата обращения: 15.12.2024).

³ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.lightcomm.com> (дата обращения: 15.12.2024).

⁴ NASA-STD-7001

$$CWT_x^\psi(\tau, s) = \Psi_x^\psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int x(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt,$$

где τ — параллельный перенос; s — масштабный коэффициент; $\psi(t)$ — материнский вейвлет.

На основе [16] использован материнский вейвлет типа «BUMP». Применение вейвлет-анализа только к интервалам вероятной модуляции значительно снижает требования к вычислительным мощностям и время полной обработки результатов эксперимента.

Рассмотрим псевдокод алгоритма, реализующего Фурье- и вейвлет-обработки измеряемой оптической мощности при воздействии вибрации. Приняты следующие обозначения: $F_m \equiv \{F_m\}$ — множество (массив) частот, для которых имеет место модуляция оптической мощности (сначала пустое \emptyset); $P \equiv \{P\}$ — множество значений мощности, отсортированных по возрастанию частоты; f — частота опроса; $p_f \equiv \{p\}_{\{f\}}$ — подмножество значений мощности $p_f \in P$, соответствующих набору частот воздействия $\{f\} \in [f_i, f_{i+\Delta t}]$ в интервале времени $t \in [t; t + \Delta t]$ при $\Delta t' = 1$ с; $\tilde{p} \equiv \{\tilde{p}\}$ — множество Фурье-образов $\{p\}_{\{f\}}$; $\tilde{p}_j \in \tilde{p}$ — элемент множества \tilde{p} ; Π — порог модуляции.

Этап 1. Поиск частот, на которых наблюдается модуляция:

$F_m = \emptyset$ множество частотных интервалов с модуляцией;
for p_f in P перебор по множествам мощностей, отсортированных по возрастанию частоты;
 $\tilde{p} = \text{FFT}(p)$ нахождение Фурье-образов;
for \tilde{p}_j in \tilde{p} перебор Фурье-образов;
if $\tilde{p}_j > \Pi$ проверка превышения порога;
 $f \cup F_m$ включение в множество интервалов с модуляцией.

Этап 2. Вейвлет-преобразование:
for f in F_m перебор по интервалам с модуляцией;
 $CWT(p_f)$ вейвлет-преобразование.

Результаты и их обсуждение

Мощность излучения на выходах Y-разветвителя совпадает не в точности 50/50. Одной из характеристик качества таких компонентов является коэффициент деления:

$$k_0 = P_1/P_2,$$

где P_1 и P_2 — мощности на выходах 1 и 2 соответствующего разветвителя при отсутствии вибраций. Изменение коэффициента деления при воздействии вибраций характеризуется величиной:

$$\varepsilon_k = |1 - k_F/k_0|,$$

где k_F — значение коэффициента деления на частоте F .

Покажем применение предложенной методики оценки чувствительности к вибрации для оптических разветвителей компаний ПНППК, BitLine и LightComm, которые в процессе эксперимента опрашивались одновременно. На рис. 3 представлены необработанные экспериментальные значения оптической мощности для разветвителей. На рис. 3, а — изменение оптической мощности на разветвителях в течение всего испытания. Ось абсцисс представлена частотой вибрационного воздействия в соответствии с рис. 2. Видно, что в процессе испытаний оптическая мощность источника (опорный луч) испытывала колебания, однако это явление можно скомпенсировать, применив к сигналу соотношение (1). Различие в среднем уровне мощности разветвителей вызвано как различным качеством сварных соединений,

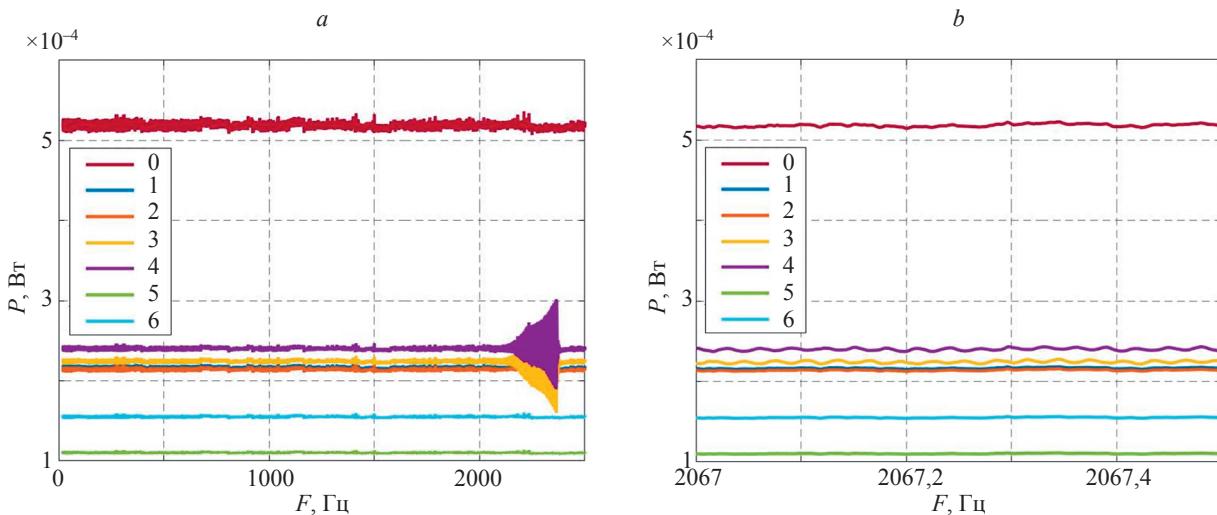


Рис. 3. Графики зависимостей прошедшей через разветвители оптической мощности P от частоты вибрационного воздействия F для различных разветвителей: весь исследуемый диапазон частот (а); фрагмент диапазона крупным планом (б). Номера зависимостей в легенде совпадают с нумерацией каналов на рис. 1: 0 — опорный сигнал; 1 и 2 — мощности на выходах разветвителя производства ПНППК; 3 и 4 — BitLine; 5 и 6 — LightComm

Fig. 3. Graph showing the dependence of the optical power (P) passed through the splitters on the vibration frequency (F) for different splitters: The whole frequency range under study (a); a close-up fragment of the range (b). The numbering of the dependencies corresponds to the channel numbering in Fig. 1: 0 — reference signal; 1 and 2 — power at the outputs of the splitter produced by PNPPK; 3 and 4 — BitLine; 5 and 6 — LightComm

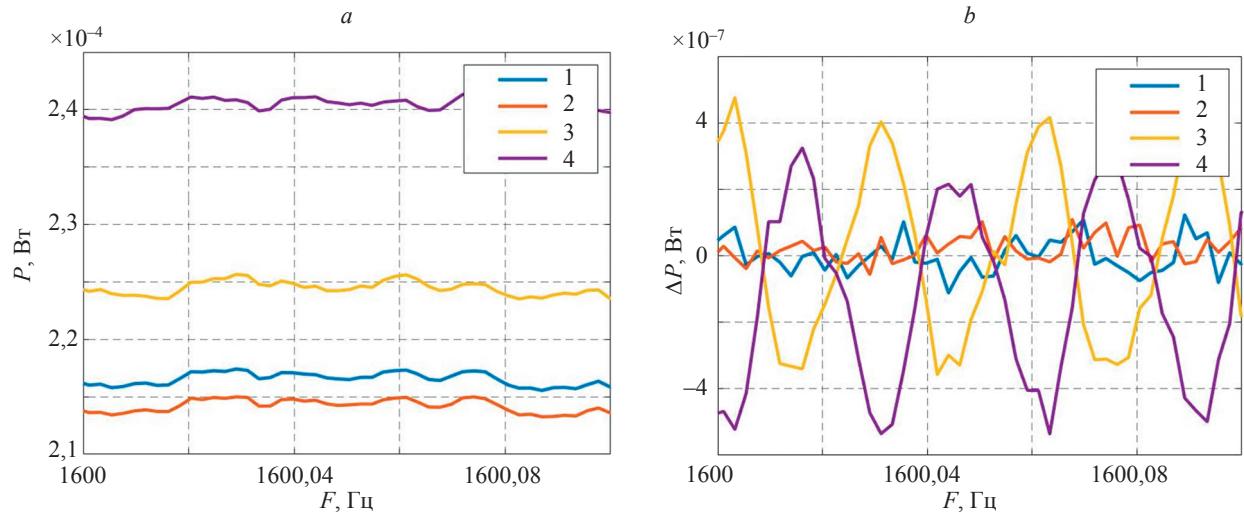


Рис. 4. Пример сигнала при вибровоздействии: без предварительной обработки (а); обработанные по соотношению (1) (б). Номера зависимостей в легенде совпадают с нумерацией каналов на рис. 1: 1 и 2 — мощности на выходах разветвителя производства ПНППК, 3 и 4 — BitLine

Fig. 4. Example of a signal under vibration action: without pre-processing (a); processed action according to relation (1) (b). The numbering of dependencies coincides with the channel numbering in Fig. 1: 1 and 2 represent the power at the outputs of the splitter produced by the PNPPK; 3 and 4 represent the BitLine

так и отличием потерь мощности, возникающих при делении. На рис. 3, б взят малый участок воздействия, на котором видно, что оптическая мощность на разветвителях компании BitLine модулируется с частотой воздействия. Остальные разветвители явной модуляции не испытали и отклонение их коэффициента деления ε_k не превышало 0,3 % от изначального k_0 .

На рис. 4, а представлены необработанные данные, на рис. 4, б показан пример обработки сигнала с помощью соотношения (1). Эта процедура позволяет повысить различимость изменений сигнала, вызванных вибровоздействием. На рис. 4, б приведены результаты для разветвителей ПНППК и BitLine. На разветвителях

BitLine видно изменение оптической мощности в связи с колебаниями коэффициента деления в результате вибрации.

На рис. 5 показан Фурье-образ мощности исходного сигнала в частотной области, приведенный в логарифмических единицах. Красной линией изображен порог, выше которого сигнал считается модулированным. Максимальная детектируемая частота модуляции сигнала на Y-разветвителе F_{\max} определяется частотой дискретизации системы опроса $F_{\text{опр}}$ и равна ее половине, т. е. при $F_{\text{опр}} = 20$ кГц максимальная частота детектируемых частот составляет $F_{\max} = F_{\text{опр}}/2 = 10$ кГц. Из рис. 5 видно, что на частоте $F = 1780$ Гц сигнал модулируется, в окрестности этой частоты будет проводиться вейвлет-анализ сигнала.

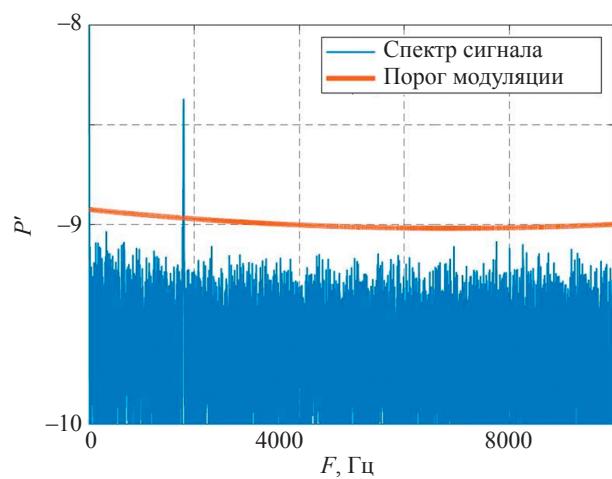


Рис. 5. Фурье-образ P' мощности исходного сигнала в частотной области F .

Величина P' приведена в логарифмических единицах

Fig. 5. Fourier image P' of the power of the original signal in the frequency domain F .
The value of P' is given in logarithmic units

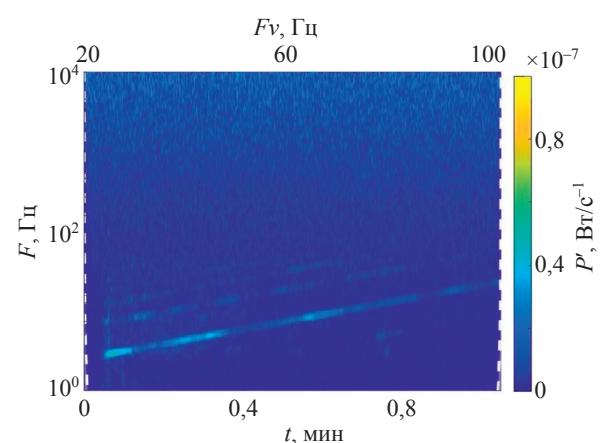


Рис. 6. Пример вейвлет картины с наблюдаемыми гармониками.

F_v — частота воздействия

Fig. 6. Example of wavelet pattern with observed harmonics.
 F_v — vibration frequency

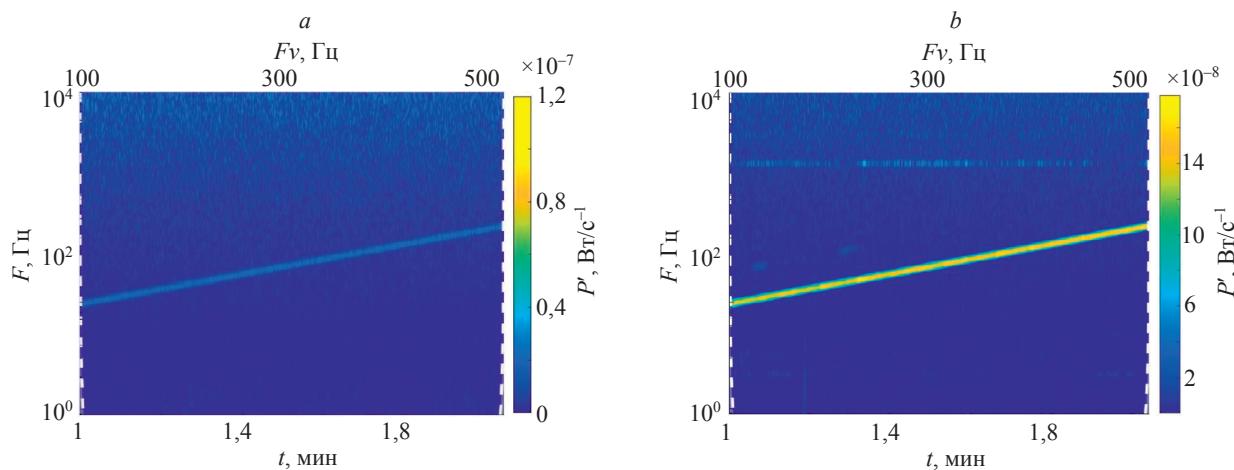


Рис. 7. Вейвлет-анализ разветвителей: LightComm (a) и BitLine (b)

Fig. 7. Wavelet analysis of optical splitters: LightComm (a) and BitLine (b)

Вейвлет-анализ позволяет выявить частоты модуляции, а также кратные им гармоники и их изменение во времени. На рис. 6 приведен пример вейвлет-анализа обработанного сигнала, на котором видно несколько полос модуляции. Угол наклона этих полос обусловлен изменением частоты со временем, их количество — количество наблюдаемых гармоник.

Анализ по предложенной методике показал стабильную слабую модуляцию на разветвителях LightComm и BitLine. Вейвлет-анализ позволил выявить резонансную частоту ($F_{\text{рез}} = 2,17 \text{ кГц}$) на разветвителях BitLine (рис. 7) при значительно более низких частотах воздействия (100–500 Гц), что говорит о перспективности метода в исследовании чувствительности компонентов в высокочастотном диапазоне. При частоте воздействия ниже 100 Гц на разветвителях ПНППК наблюдалось несколько гармоник модуляции мощности, на больших частотах модуляция не обнаружена.

В таблице обобщены результаты проведенных испытаний разветвителей. Представлены коэффициент деления без вибрации k_0 , его относительное изменение ε_k , вызванное вибрацией, и максимальная амплитуда модуляции мощности $P_{\text{мод}}$.

Представленные результаты показывают, что воздействие вибрации на компоненты может приводить к значительным изменениям их характеристик. При этом изменение коэффициента деления периодично и повторяет внешнее воздействие. Стандартным допуском для Y-разветвителей 50/50 считается отклонение коэффициента деления на 2 % при нормальных климатических условиях (температура 15–35 °C, относительная влажность воздуха 45–80 %, атмосферное давление 84,0–106,7 кПа)¹. Как видно из полученных данных, все разветвители удовлетворяли этому требованию, однако

Таблица. Изменение параметров разветвителей, вызванное вибрацией

Table. Variation of splitter parameters caused by vibration

Производитель	k_0 , %	ε_k , %	$P_{\text{мод}}$, нВт
LightComm	50,2/49,8	0,1	250
BitLine	48,3/51,7	1,3 (24*)	50 000
ПНППК	48,4/51,6	менее 0,1 (0,3**)	400

Примечание. * — отклонение на резонансной частоте 2,17 кГц; ** — на частотах до 100 Гц.

при воздействии вибрации образец BitLine вышел за данную границу на резонансной частоте.

Заключение

В работе представлена методика количественного определения чувствительности оптических компонентов к вибрации. Предложен экспериментальный стенд, позволяющий реализовывать вибрационное воздействие различной частоты на оптические компоненты, а также количественно определять величину модуляции проходящего оптического излучения в зависимости от частоты воздействия. Разработан алгоритм постобработки и анализа данных, основанный на Фурье- и вейвлет-преобразованиях.

С помощью разработанного программного комплекса протестированы разветвители различных производителей. Определено влияние частоты вибрации на коэффициент деления и амплитуду модуляции оптической мощности. Предложенный метод позволяет наблюдать модуляцию мощности менее 0,1 % от мощности исходного сигнала и определять резонансную частоту исследуемого объекта при частоте вибровоздействия ниже резонансной. Применение разработанного алгоритма обеспечивает наглядное исследование модуляции, вызванной внешними факторами, не только механическими, но и потенциально термическими.

Таким образом, продемонстрированный комплекс и методика применимы для определения вибрационной

¹ ГОСТ 15150–69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. Введен 01.01.1971. М.: Стандартинформ, 2010. 85 с.

чувствительности не только пассивных оптических компонентов типа разветвителей, но и для активных источников излучения, и позволит подбирать более

качественные детали, тем самым улучшив параметры волоконных гироскопов.

Литература

- Hati A., Nelson C.W., Taylor J., Ashby N., Howe D.A. Cancellation of vibration-induced phase noise in optical fibers // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2008. V. 20. N 22. P. 1842–1844. <https://doi.org/10.1109/lpt.2008.2004697>
- Liu X., Jin B., Bai Q., Wang Y., Wang D., Wang Y. Distributed fiber-optic sensors for vibration detection // *Sensors*. 2016. V. 16. N 8. P. 1164. <https://doi.org/10.3390/s16081164>
- Li R.-J., Lei Y.-J., Chang Z.-X., Zhang L.-S., Fan K.-C. Development of a high-sensitivity optical accelerometer for low-frequency vibration measurement // *Sensors*. 2018. V. 18. N 9. P. 2910. <https://doi.org/10.3390/s18092910>
- Aleksandr A. Vlasov, Mikhail Yu. Plotnikov Artem N. Ashirov, Artem S. Aleynik. The method for protection of sensitive fiber optic components from environmental noise and vibration impacts // Proc. of the IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). 2019. P. 305–307. <https://doi.org/10.1109/EExPolytech.2019.8906889>
- Song N., Zhang C., Du X. Analysis of vibration error in fiber optic gyroscope // Proceedings of SPIE. 2002. V. 4920. P. 115–121. <https://doi.org/10.1117/12.481959>
- Zhang Y., Gao G. Fiber optic gyroscope vibration error due to fiber tail length asymmetry based on elastic-optic effect // *Optical Engineering*. 2012. V. 51. N 12. P. 124403. <https://doi.org/10.1117/1.OE.51.12.124403>
- Li H., Cui L., Lin Z., Zhang C. Analysis and optimization of dynamic measurement precision of fiber optic gyroscope // *Mathematical Problems in Engineering*. 2013. V. 2013. P. 265895. <https://doi.org/10.1155/2013/265895>
- Osunluk B. Environmental effects on interferometric fiber optic gyroscope performance. Dissertation for the degree of PhD in electrical and electronics engineering. Bilkent University, 2021. 110 p.
- Frigo M., Johnson S.G. FFTW: An adaptive software architecture for the FFT. // Proc. of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. 1998. V. 3. P. 1381–1384. <https://doi.org/10.1109/icassp.1998.681704>
- Зименко К.А., Боргуль А.С., Маргун А.А. Анализ и обработка сигналов электромиограммы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. Т. 13. № 1. С. 41–43.
- Козинов И.А. Обнаружение локальных свойств анализируемых сигналов и процессов с использованием вейвлет-преобразования // Информационно-управляющие системы. 2015. № 1 (74). С. 21–28. <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2015.1.21>
- Mahamune R., Laskar S.H. Classification of the four-class motor imagery signals using continuous wavelet transform filter bank-based two-dimensional images // *International Journal of Imaging Systems and Technology*. 2021. V. 31. N 4. P. 2237–2248. <https://doi.org/10.1002/ima.22593>
- Lilly J.M., Olhede S.C. Generalized Morse wavelets as a superfamily of analytic wavelets // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2012. V. 60. N 11. P. 6036–6041. <https://doi.org/10.1109/TSP.2012.2210890>
- Lilly J.M., Olhede S.C. Higher-order properties of analytic wavelets // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2009. V. 57. N 1. P. 146–160. <https://doi.org/10.1109/TSP.2008.2007607>
- Lilly J.M. Element analysis: a wavelet-based method for analysing time-localized events in noisy time series // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2017. V. 473. N 2200. P. 20160776. <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0776>
- Qin Z., Chen L., Bao X. Continuous wavelet transform for non-stationary vibration detection with phase-OTDR // *Optics Express*. 2012. V. 20. N 18. P. 20459–20465. <https://doi.org/10.1364/OE.20.020459>
- Hati A., Nelson C.W., Taylor J., Ashby N., Howe D.A. Cancellation of vibration-induced phase noise in optical fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, vol. 20, no. 22, pp. 1842–1844. <https://doi.org/10.1109/lpt.2008.2004697>
- Liu X., Jin B., Bai Q., Wang Y., Wang D., Wang Y. Distributed fiber-optic sensors for vibration detection. *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 8, pp. 1164. <https://doi.org/10.3390/s16081164>
- Li R.-J., Lei Y.-J., Chang Z.-X., Zhang L.-S., Fan K.-C. Development of a high-sensitivity optical accelerometer for low-frequency vibration measurement. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 9, pp. 2910. <https://doi.org/10.3390/s18092910>
- Aleksandr A. Vlasov, Mikhail Yu. Plotnikov Artem N. Ashirov, Artem S. Aleynik. The method for protection of sensitive fiber optic components from environmental noise and vibration impacts. *Proc. of the IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*, 2019, pp. 305–307. <https://doi.org/10.1109/EExPolytech.2019.8906889>
- Song N., Zhang C., Du X. Analysis of vibration error in fiber optic gyroscope. *Proceedings of SPIE*, 2002, vol. 4920, pp. 115–121. <https://doi.org/10.1117/12.481959>
- Zhang Y., Gao G. Fiber optic gyroscope vibration error due to fiber tail length asymmetry based on elastic-optic effect. *Optical Engineering*, 2012, vol. 51, no. 12, pp. 124403. <https://doi.org/10.1117/1.OE.51.12.124403>
- Li H., Cui L., Lin Z., Zhang C. Analysis and optimization of dynamic measurement precision of fiber optic gyroscope. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, vol. 2013, pp. 265895. <https://doi.org/10.1155/2013/265895>
- Osunluk B. Environmental effects on interferometric fiber optic gyroscope performance. Dissertation for the degree of PhD in electrical and electronics engineering. Bilkent University, 2021, 110 p.
- Frigo M., Johnson S.G. FFTW: An adaptive software architecture for the FFT. *Proc. of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1998, vol. 3, pp. 1381–1384. <https://doi.org/10.1109/icassp.1998.681704>
- Zimenko K.A., Borgul A.S., Margun A.A. Analysis and processing of electromyogram signals. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 41–43. (in Russian)
- Kozinov I.A. Detecting local characteristic of analyzed signals and processes using wavelet transformation. *Information and Control Systems*, 2015, no. 1 (74), pp. 21–28. (in Russian). <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2015.1.21>
- Mahamune R., Laskar S.H. Classification of the four-class motor imagery signals using continuous wavelet transform filter bank-based two-dimensional images. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 2021, vol. 31, no. 4, pp. 2237–2248. <https://doi.org/10.1002/ima.22593>
- Lilly J.M., Olhede S.C. Generalized Morse wavelets as a superfamily of analytic wavelets. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, vol. 60, no. 11, pp. 6036–6041. <https://doi.org/10.1109/TSP.2012.2210890>
- Lilly J.M., Olhede S.C. Higher-order properties of analytic wavelets. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, vol. 57, no. 1, pp. 146–160. <https://doi.org/10.1109/TSP.2008.2007607>
- Lilly J.M. Element analysis: a wavelet-based method for analysing time-localized events in noisy time series. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2017, vol. 473, no. 2200, pp. 20160776. <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0776>
- Qin Z., Chen L., Bao X. Continuous wavelet transform for non-stationary vibration detection with phase-OTDR. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 18, pp. 20459–20465. <https://doi.org/10.1364/OE.20.020459>

References

- Hati A., Nelson C.W., Taylor J., Ashby N., Howe D.A. Cancellation of vibration-induced phase noise in optical fibers // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2008. V. 20. N 22. P. 1842–1844. <https://doi.org/10.1109/lpt.2008.2004697>
- Liu X., Jin B., Bai Q., Wang Y., Wang D., Wang Y. Distributed fiber-optic sensors for vibration detection. *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 8, pp. 1164. <https://doi.org/10.3390/s16081164>
- Li R.-J., Lei Y.-J., Chang Z.-X., Zhang L.-S., Fan K.-C. Development of a high-sensitivity optical accelerometer for low-frequency vibration measurement. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 9, pp. 2910. <https://doi.org/10.3390/s18092910>
- Aleksandr A. Vlasov, Mikhail Yu. Plotnikov Artem N. Ashirov, Artem S. Aleynik. The method for protection of sensitive fiber optic components from environmental noise and vibration impacts. *Proc. of the IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*, 2019, pp. 305–307. <https://doi.org/10.1109/EExPolytech.2019.8906889>
- Song N., Zhang C., Du X. Analysis of vibration error in fiber optic gyroscope. *Proceedings of SPIE*, 2002, vol. 4920, pp. 115–121. <https://doi.org/10.1117/12.481959>
- Zhang Y., Gao G. Fiber optic gyroscope vibration error due to fiber tail length asymmetry based on elastic-optic effect. *Optical Engineering*, 2012, vol. 51, no. 12, pp. 124403. <https://doi.org/10.1117/1.OE.51.12.124403>
- Li H., Cui L., Lin Z., Zhang C. Analysis and optimization of dynamic measurement precision of fiber optic gyroscope. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, vol. 2013, pp. 265895. <https://doi.org/10.1155/2013/265895>
- Osunluk B. Environmental effects on interferometric fiber optic gyroscope performance. Dissertation for the degree of PhD in electrical and electronics engineering. Bilkent University, 2021, 110 p.
- Frigo M., Johnson S.G. FFTW: An adaptive software architecture for the FFT. *Proc. of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1998, vol. 3, pp. 1381–1384. <https://doi.org/10.1109/icassp.1998.681704>
- Zimenko K.A., Borgul A.S., Margun A.A. Analysis and processing of electromyogram signals. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 41–43. (in Russian)
- Kozinov I.A. Detecting local characteristic of analyzed signals and processes using wavelet transformation. *Information and Control Systems*, 2015, no. 1 (74), pp. 21–28. (in Russian). <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2015.1.21>
- Mahamune R., Laskar S.H. Classification of the four-class motor imagery signals using continuous wavelet transform filter bank-based two-dimensional images. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 2021, vol. 31, no. 4, pp. 2237–2248. <https://doi.org/10.1002/ima.22593>
- Lilly J.M., Olhede S.C. Generalized Morse wavelets as a superfamily of analytic wavelets. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, vol. 60, no. 11, pp. 6036–6041. <https://doi.org/10.1109/TSP.2012.2210890>
- Lilly J.M., Olhede S.C. Higher-order properties of analytic wavelets. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, vol. 57, no. 1, pp. 146–160. <https://doi.org/10.1109/TSP.2008.2007607>
- Lilly J.M. Element analysis: a wavelet-based method for analysing time-localized events in noisy time series. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2017, vol. 473, no. 2200, pp. 20160776. <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0776>
- Qin Z., Chen L., Bao X. Continuous wavelet transform for non-stationary vibration detection with phase-OTDR. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 18, pp. 20459–20465. <https://doi.org/10.1364/OE.20.020459>

Авторы

Смертин Роман Михайлович — инженер-исследователь, Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, 614990, Российская Федерация; студент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, 614990, Российской Федерации, <https://orcid.org/0009-0002-7329-9413>, romsmerm@gmail.com

Никулин Илларион Леонидович — доктор технических наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, 614990, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-8496-7942>, nil@pstu.ru

Статья поступила в редакцию 25.01.2025
Одобрена после рецензирования 21.06.2025
Принята к печати 22.07.2025

Authors

Roman M. Smertin — Engineer-Reseacher, Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company (PAO PNPPK), Perm, 614990, Russian Federation; Student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0002-7329-9413>, romsmerm@gmail.com

Ilarion L. Nikulin — D.Sc., Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8496-7942>, nil@pstu.ru

Received 25.01.2025
Approved after reviewing 21.06.2025
Accepted 22.07.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»