

Доступ к базам данных пользователей на сервере осуществляется через соответствующие пароли, предоставляемые разработчиком БСМ.



Рисунок 3 – Фото ФЭМ БСМ

БСМ обеспечивает:

- сбор измерительной информации с распределенных функциональных сенсорных модулей;
- передачу данных на базовую станцию по беспроводным каналам радиосвязи;
- обработку, регистрацию, хранение полученных данных в табличном и графическом виде;
- трансляция данных в сеть Интернет и их размещение на выделенном сервере с возможностью доступа к ним пользователей;
- формирование конфигурации системы по требованию потребителя.
- автоматическое формирование электронного журнала учета измеряемых параметров;
- установку пределов измеряемых параметров;
- настройку интервалов считывания данных с функциональных сенсорных модулей.

Основные параметры БСМ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры БСМ

Параметр	Значение
Диапазон измерения температуры	от -40 до +85 °С
Диапазон измерения отн. влажности	от 0 до 98 %
Диапазон измерения атм. давления,	от 300 до 1100 гПа
Диапазон измерения освещенности	от 10 до 60 000 лк
Расчет точки росы	есть
Канал связи	радиоканал 433 МГц
Дальность связи	500 м

Преимущества БСМ:

- простая установка и настройка (не требуется прокладки проводов/кабелей);
- предоставление потребителю требуемого ПО и серверной инфраструктуры;
- круглосуточный доступ к данным из любой удаленной точки;
- гибкость и масштабируемость (легко изменить структуру оборудования и пользователей);
- автоматическое формирование таблиц, графиков, отчетов;
- низкая стоимость внедрения и эксплуатации.

Разработанная БСМ может быть использована для контроля и мониторинга окружающей среды в помещениях, складах, хранилищах, на производственных участках, технологических линиях, коммунальных хозяйствах.

Литература

1. Мониторинг окружающей среды // Области экологии: [сайт]. – URL: <https://oblasti-ekologii.ru/ecology/ekologiceskij-risk-kontrol-i-monito> (дата обращения: 20.02.2025).
2. Системы мониторинга окружающей среды // Лабдепо: [сайт]. – URL: <https://labdepot.ru/oborudovanie/kontrol-parametrov-okruzhayushch> (дата обращения: 20.02.2025).

УДК 519.24

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА НА ДОСТОВЕРНОСТЬ ДИСТАНЦИОННОЙ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ПО ЛАЗЕРНЫМ СПЕКЛАМ

Иванов В. И.

НИИ ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь

Аннотация. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния параметров движения объекта на достоверность результатов вибродиагностики по амплитудно-частотному спектру флуктуаций отраженного лазерного излучения в режиме прямого фотодетектирования сигнала. Получены расчетные соотношения для определения максимально возможных дистанций вибродиагностики с учетом скоростных и угловых параметров движения виброповерхности.

Ключевые слова: лазерная спекл-виброметрия

INFLUENCE OF OBJECT MOVEMENT PARAMETERS ON THE RELIABILITY OF REMOTE VIBRATION DIAGNOSTICS BY LASER SPECLE

Ivanov V.I.

Institute for nuclear problems of Belarusian state university, Minsk, Belarus

Abstract. The article presents the results of theoretical and experimental studies of the influence of object motion parameters on the reliability of vibration diagnostics results based on the amplitude-frequency spectrum of reflected laser radiation fluctuations in the direct photodetection mode of the signal. Calculation relationships are obtained for determining the maximum possible vibration diagnostics distances taking into account the speed and angular parameters of the vibration surface motion.

Keywords: aaser speckle vibrometry.

Адрес для переписки: Иванов В. И., ул. Голубева, д. 5, кв. 103, г. Минск 220116, Республика Беларусь
e-mail: 46vanov.inpr@gmail.com

Интерференционная картина (спекл – поле) лазерного излучения на шероховатой поверхности обусловлена фазовыми соотношениями интерферирующих волн, которые в свою очередь весьма чувствительны к параметрам вибраций данных поверхностей [1, 2]. При этом от частоты колебаний (вибраций) поверхности объекта вполне определенным образом зависит спектр временных флуктуаций интенсивности принимаемого спекл-сигнала $I(t)$ [3, 4], что позволяет дистанционно определять как радиальные, так и тангенциальные микровибрации различных объектов, например, в задачах диагностики и распознавания различных наземных и воздушных объектов по их вибрационным характеристикам [5].

При движении объекта освещенный участок его поверхности кроме колебательных движений (вибраций) может совершать как поступательное движение вдоль оптической оси вибromетра (лазерного луча), так и поперечное движение в плоскости, перпендикулярной лазерному лучу. Это влияет на динамику спеклов, а, соответственно, изменяет спектр флуктуаций интенсивности регистрируемого сигнала от вибрирующей поверхности и может приводить к большим ошибкам.

При движении поверхности вдоль направления наблюдения интенсивность в некоторой точке спекл-структуры существенно изменяется, когда разность фаз световых волн, рассеянных краями разрешаемого элемента и его центром, достигнет величины 2π . В соответствии с [2] это условие будет выполнено, если объект, за время наблюдения, сместится на расстояние ΔZ , равное:

$$\Delta Z \Delta Z = \sqrt{2l_1 \lambda}, \quad (1)$$

где l_1 – расстояние от объекта до приемной оптической системы (ОС) вибromетра.

Таким образом, с увеличением расстояний до объекта ΔZ также увеличивается. Например, при $l_1 = 1$ км и $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-6}$ м, $\Delta Z \cong 3$ см. Следовательно, плоскости фотодетектора; $K = 2\pi/\lambda$ – волновое число; q – радиус апертуры ОС; $J_m(\gamma x)$ – функция Бесселя первого рода.

При большой амплитуде угловых колебаний вектора нормали к поверхности объекта $\gamma = 10$

$$\gamma = 2K\rho_0 A_0, \quad (3)$$

где $A_0 = |\nabla f(0)|$ – градиент функции колебания поверхности f в точке наблюдения.

Общий характер уширения сохраняется за исключением некоторых деталей. В частности, ширина компонент с $m \neq 0$ практически не

увеличивается в процессе уменьшения угла φ до нуля и может быть принята равной $\sigma\Delta$.

В пределе при $\vec{v} \rightarrow 0$ правая часть (2) стремится к дельта-функции с коэффициентом G_m [3]

$$G_m = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty e^{(-x^2/2)} J_m^2(\gamma x) dx. \quad (4)$$

Влияние поперечного движения на спектр флуктуаций интенсивности регистрируемого сигнала в определенной степени зависит от угла φ . Если скорость поверхности объекта направлена перпендикулярно к плоскости колебания вектора нормали поверхности, т. е. $\varphi = \pi/2$, то равенство (2) упрощается

$$G_m(\Omega, \varphi)_{\varphi=\pi/2} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{\Omega}{2\sigma_0}\right)^2} G_m, \quad (5)$$

где $\sigma_0 = \sigma\sqrt{1 + \Delta^2}$, а величина G_m определяется формулой (4).

В данном случае все спектральные компоненты сигнала G_m имеют гауссовскую форму с параметром σ_0 , характеризующим спектральную ширину компоненты. При $\Delta \ll 1$ ширина компоненты определяется параметром σ , который можно представить в виде

$$\sigma = \frac{KqV}{2l_1 w_0}. \quad (6)$$

Величина параметра σ обратно пропорциональна расстоянию до объекта и частоте акустических колебаний w_0 . Для того, чтобы сигнальный спектр не сильно искажался движением объекта необходимо выполнение условия $\sigma < 1$. Отсюда получаем ограничение на допустимую поперечную скорость объекта относительно оптической оси вибromетра.

$$V < \frac{2l_1 w_0}{Kq} = v_{max}. \quad (7)$$

Из условия (7) видно, что чем ближе к вибromетру находится объект и чем ниже частота колебаний его поверхности, тем меньше должна быть его поперечная скорость для успешного функционирования рассматриваемого метода. Например, при $l_1 = 1$ км; $q = 0,1$ м; $\lambda = 0,6 \cdot 10^{-6}$ м; $w_0 = 500$ Гц, из (7) получим $v_{max} = 10$ м/сек.

Оценка (7) справедлива лишь при малости параметра Δ . Если положить параметр расфокусировки $\Psi_1 = 0$, то условие малости параметра Δ запишется в виде:

$$l_1 < \frac{q^2 K}{2}. \quad (8)$$

Таким образом, при выбранных выше параметрах оптической системы ЛСМД условие (7) применимо для расстояний менее 50 км. В случае

расстояний в 100 и более километров в выражении для σ_0 можно пренебречь единицей под корнем и максимально допустимая скорость объекта принимает вид:

$$V_{max} = qw_0. \quad (9)$$

Для больших расстояний v_{max} не зависит от дальности до объекта и определяется только размером приемной апертуры и частотой вибраций.

В частности, при указанных выше значениях влияние на динамику спеклов продольной составляющей движения поверхности объекта, для больших расстояний наблюдения, пренебрежимо мало.

Более сложным является вопрос исследования влияния поперечного движения объекта со скоростью v на спектр временных флуктуаций интенсивности сигнала в некоторой точке спекл-структуры поля.

Теоретические и экспериментальные исследования, данного вопроса, проведенные для одномодовой вибрации поверхности, показывают, что спектр временных флуктуаций интенсивности фототока сигнала $I(t)$ при наличии поперечного движения освещенной поверхности является непрерывным, а не дискретным, как в случае неподвижной поверхности [4]. Это говорит о том, что функция фототока $I(t)$ уже не обладает свойством строгой периодичности. Движение объекта приводит к уширению отдельных спектральных составляющих $G_m \sigma(w-mw_0)$.

В данном случае параметр G_m это безразмерная величина нормированного квадрата модуля m -той гармоники сигнала. Характер уширения спектральных компонент G_m зависит, как от величины поперечной скорости, так и от ее направления согласно уравнению:

$$G_m = \frac{1}{2\pi\sigma} (1 + \Delta^2 \sin^2 \varphi)^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{x\sigma\Delta \cos \varphi - \Omega}{2\sigma^2(1 + \Delta^2 \sin^2 \varphi)} \right\} * e^{(-x^2/2)} J_m^2(\gamma x) dx, \quad (2)$$

где $\sigma = \frac{v}{\rho_0 w_0}$; $\Delta = \rho_0^2 \left(\frac{K}{l_1} - \frac{\psi_1}{\rho_0^2} \right)$; φ – угол между направлением вектора скорости V и плоскостью колебания вектора нормали к облученной поверхности; $\Omega = \frac{w}{w_0} - m$ – относительная частота;

$\rho_0 = \frac{l_1 \sqrt{2(1+\psi_1)}}{Kq}$ – параметр, характеризующий линейное разрешение оптической системы (ОС); $\psi_1 = \frac{Kq^2}{2} \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} - \frac{1}{F} \right)$ – параметр расфокусировки (при точно сфокусированном лазерном излучении на поверхности объекта $\psi_1 = 0$; l_2 – расстояние от ОС до параметров $v_{max} = 100$ м/с.

Следует отметить, что на больших расстояниях ограничение на максимальную поперечную скорость объекта можно существенно ослабить путем расфокусировки оптической системы. Так как величина зависит от параметра расфокусировки ψ_1 , то при его значении:

$$\psi_1 = \frac{1}{q} \sqrt{\frac{2l_1}{K}} \quad (10)$$

получим $\Delta=0$. Величина v_{max} в этом случае определяется соотношением (7) и может принимать достаточно большие значения.

Эффект уширения спектральных компонент G_m , когда вектор скорости v не ортогонален плоскости колебания вектора нормали к поверхности, качественно отличается от рассмотренного выше случая. Здесь картина уширения различна для компонент с $m=0$ и $m \neq 0$. При малых амплитудах акустических колебаний поверхности ($\gamma = 1$) нулевая компонента спектра по мере уменьшения угла φ от 90° до 0° несколько сужается, сохраняя гауссоподобную форму. Совершенно по-иному меняется форма компонент спектра с $m \neq 0$. При уменьшении угла φ уширение компонент увеличивается, причем функция, описывающая уширение, приобретает двухмодовую форму, т. е. расширение сопровождается расщеплением компоненты на два пика. Степень проявления этого эффекта увеличивается вместе с ростом числа m .

Одновременно с расщеплением у этих компонент наблюдается появление дополнительных пиков меньшей величины, т. е. функция уширения приобретает многомодовый характер. Это приводит к искажению спектра сигнала $I(t)$, а соответственно и к снижению достоверности вибродиагностики.

С физической точки зрения наблюдающийся сложный эффект уширения спектральных компонент, когда вектор поперечной скорости лежит в плоскости колебания вектора нормали, по-видимому, можно объяснить результатом сложения колебательного движения спеклов, вызванного колебанием поверхности, с поступательным движением спекл-структуры в том же направлении, которое связано с движением объекта, как целого.

Из приведенных результатов также следует, что независимо от величины угла φ за оценку степени уширения спектральной компоненты можно принять величину $\sigma'_0 = \sigma \Delta$. Следовательно, выражение (9) позволяет получать оценки максимально допустимой поперечной скорости объекта также и при произвольной ориентации направления вектора скорости.

Литература

1. Франсон, М. Оптика спеклов / М. Франсон. – М.: Мир, 1980. – 171 с.
2. Джоунс, Р. Голографическая и спекл-интерферометрия / Р. Джоунс, К. Уайкс. – М.: Мир, 1986. – 327 с.
3. Пресняков, Ю. П. Использование спекл-эффекта для анализа колебаний шероховатой поверхности / Ю. П. Пресняков, В. П. Щепинов // Журнал теоретической физики. – 1997. – Т. 67, № 8. – С. 71–75.
4. Иванов, В. И. Теоретические и экспериментальные исследования лазерного спекл-анализа микровибраций и смещений / В. И. Иванов, Н. И. Иванов // Приборостроение-2022: материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2022. – С. 106–108.
5. Лазер научится идентифицировать цели // N+1: [сайт]. – 2015. – 23 ноября. – URL: <https://nplus1.ru/news/2015/11/23/laser/> (дата обращения: 21.03.2025).