

## ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ СООТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ НА СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОГРАММАХ

Жужукин А.И., Соляников В.А.  
ОАО «КУЗНЕЦОВ», Самара

### Аннотация

С целью повышения точности и достоверности получаемых результатов при исследованиях вибрационных характеристик элементов конструкций разработаны метод повышения соотношения сигнал/шум на спекл-интерферограммах для оптических схем с гладкой опорной волной и разделёнными пучками и методика его реализации.

**Ключевые слова:** спекл-интерферометрия, лазерные спеклы, соотношение сигнал/шум, измерение вибраций.

### Введение

При создании новых машин и механизмов важное значение имеет обеспечение их вибрационной прочности и надёжности. В связи с этим одной из главных задач является исследование вибрационных характеристик деталей и узлов и, в первую очередь, их собственных частот и форм колебаний, а также полей вибросмещений. В настоящее время к наиболее эффективным средствам исследования частот и форм колебаний деталей относятся методы цифровой спекл-интерферометрии (ЦСИ) [1, 2]. Однако главным недостатком метода ЦСИ является невысокое соотношение сигнал/шум на спекл-интерферограммах, что затрудняет получение количественных данных о вибрациях исследуемого объекта, и, как следствие, снижение информативности полученных результатов. Для устранения указанного недостатка в оптической схеме ЦСИ предложено использовать поляризационный фильтр.

### Формирование спекл-интерферограммы при вибрационных исследованиях

При вибрационных исследованиях в большинстве случаев используются оптические схемы ЦСИ с гладкой опорной волной и разделёнными пучками [1-3]. Если объект колеблется на одной из резонансных форм, то, в соответствии с [4], на экране монитора наблюдается изображение интерференционной картины, яркость которого может быть описана выражением:

$$B = 4b \left[ \langle I_s \rangle \cdot \langle I_o \rangle J_0^2 \left( \frac{4\pi A(x, y)}{\lambda} \right) \times \right. \\ \left. \times \cos^2(\phi_s - \phi_o) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

Здесь  $b$  – коэффициент, зависящий от параметров системы ввода,  $\langle I_s \rangle$ ,  $\langle I_o \rangle$  – усреднённая за время ввода яркость предметного и опорного пучков,  $J_0$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка,  $A(x, y)$  – амплитуда колебаний поверхности в точке  $(x, y)$ ,  $\phi_s, \phi_o$  – фаза предметного и опорного пучков в точке  $(x, y)$ .

Информацию об амплитуде колебаний объекта содержит член  $J_0(4\pi A(x, y)/\lambda)$ , в то время как  $\langle I_o \rangle$ ,  $\phi_o$  для ЦСИ с гладкой опорной волной представляют собой слабо меняющиеся величины,  $\langle I_s \rangle$ ,  $\phi_s$  – случайные величины и являются источниками спекл-шумов. Выражение (1) показывает, что интенсивность интерференционных полос в наблюдаемом изображении изменяется по поверхности с изменением функции  $J_0$  в зависимости от амплитуды колебаний точек объекта. Наиболее контрастные полосы будут только в областях изображения, близких к узловым линиям, с минимальной амплитудой колебаний, там где функция  $J_0$  близка к единице. Кроме того, из выражения (1) следует, что спекл-шумы имеют мультипликативный характер, и это значительно затрудняет их подавление с помощью цифровых фильтров. Поэтому необходимо снижать уровень спекл-шумов на стадии проведения эксперимента.

В работе [5] показано, что соотношение сигнал/шум на спекл-интерферограмме для ЦСИ с гладким опорным пучком определяется следующим выражением:

$$\frac{S}{N} = \frac{g\sqrt{k} \cdot \rho}{\left( 1 + k + 2\sqrt{1 + \frac{k^2}{250} + 2k} \right)} \cdot I_{нас}, \quad (2)$$

где  $g, \rho$  – коэффициенты, определяемые телекамерой и устройством ввода,  $k$  – соотношение интенсивностей опорного и предметного пучков,  $I_{нас}$  – интенсивность насыщения телекамеры.

В соответствии с выражением (2), соотношение  $S/N$  прямо пропорционально зависит от  $I_{нас}$ . При этом на величину  $I_{нас}$  существенную роль оказывают поляризационные эффекты. Ввиду того, что схема спекл-интерферометра с гладким опорным пучком, как правило, располагается на горизонтальном столе, используемый лазерный пучок линейно поляризован в вертикальном направлении. Однако при рассеянии света диффузной поверхностью объекта до 50% излучения может изменить вертикальное направление поляризации на горизонтальное [6]. В результате обе эти компоненты попадают на свето-

чувствительную матрицу телекамеры, но только вертикальная компонента, совпадающая с направлением поляризации опорной волны, участвует в образовании спекл-интерферограммы. Горизонтальная составляющая приводит к преждевременному насыщению светочувствительных ячеек ПЗС (приборы с зарядовой связью) матрицы телекамеры и, в соответствии с выражением (2), к уменьшению соотношения  $S/N$  на спекл-интерферограмме. При вибрационных исследованиях, где видность интерференционных полос, описываемых функцией Бесселя, и без того низка, это приводит к дополнительным трудностям при определении амплитуды колебаний.

**Оптическая схема ЦСИ, методика проведения и результаты эксперимента**

Для устранения горизонтальной компоненты рассеянного диффузным объектом излучения в оптическую схему ЦСИ с гладкой опорной волной и разделёнными пучками, развёрнутую на горизонтальном оптическом столе, дополнительно вводится поляризационный фильтр (рис. 1).

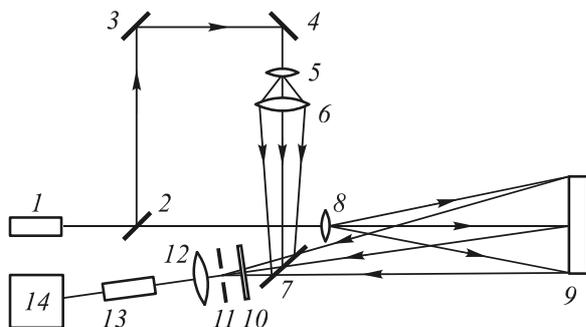


Рис. 1. Оптическая схема спекл-интерферометра с гладким опорным пучком, с применением поляризационного фильтра: 1 – лазер, 2 – делитель пучка, 3, 4 – поворотные зеркала, 5, 6 – линзы, 7 – оптический клин, 8 – расширительная линза, 9 – исследуемый объект, 10 – поляризационный фильтр, 11 – диафрагма, 12 – объектив телекамеры, 13 – телекамера, 14 – персональная ЭВМ

Принцип работы этого устройства аналогичен работе установок, описанных в [1, 2]. Отличительной особенностью данной схемы является наличие поляризационного фильтра 10, который устанавливается так, чтобы на ПЗС-матрицу телекамеры попадала та часть рассеянного объектом излучения, поляризация которой совпадает с поляризацией опорной волны. На рис. 2 на примере лопатки компрессора газотурбинного двигателя показаны результаты применения поляризационного фильтра в оптической схеме ЦСИ, приведённой на рис. 1. Следует отметить, что аналогичные результаты были получены и на других конструкциях лопаток (как компрессора, так и турбины), причём эффект применения поляризационного фильтра наиболее значимо проявлялся для слабозбуждаемых форм колебаний.

Ввиду того, что на спекл-интерферограмме интерференционная полоса формируется спеклистой

структурой, для оценки качества спекл-интерферограммы в настоящей работе использовалось усреднённое соотношение  $(S/N)_{cp}$ , которое рассчитывалось по формуле:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{cp} = \frac{B_{cp(max)} - B_{cp(min)}}{B_{cp(min)}}, \tag{3}$$

где  $B_{cp(max)}$  – средняя яркость в центре светлой полосы,  $B_{cp(min)}$  – средняя яркость в центре тёмной полосы.

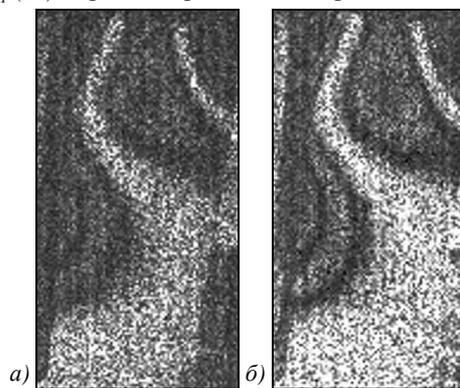


Рис. 2. Спекл-интерферограммы колеблющейся на частоте  $F = 2511$  Гц лопатки компрессора, полученные в оптической схеме ЦСИ: без применения поляризационного фильтра (а); с применением поляризационного фильтра (б)

Видность интерференционных полос определяется:

$$V_{cp} = \frac{B_{cp(max)} - B_{cp(min)}}{B_{cp(max)} + B_{cp(min)}}. \tag{4}$$

Очевидно, что

$$V_{cp} = \frac{(S/N)_{cp}}{(S/N)_{cp} + 2}. \tag{5}$$

Исследуемые области спекл-интерферограммы показаны на рис. 3.

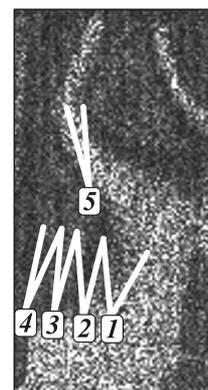


Рис. 3. Анализируемые полосы спекл-интерферограммы колеблющейся лопатки компрессора

На рис. 4 приведены графики зависимости соотношения сигнал/шум от величины амплитудного значения на участках 1, 2, 3, 4, указанных на рис. 3. При этом соотношение  $(S/N)_{cp}$  рассчитывалось согласно выражению (3), где  $B_{cp(max)}$ ,  $B_{cp(min)}$  выбиралось на от-

меченных участках рис. 3. Амплитудное значение колебаний лопатки вычислялось по формуле:

$$A_i = \frac{n_i}{4\pi} \cdot \lambda, \quad (6)$$

где  $i$  – номер экстремума функции Бесселя,  $n_i$  – значение функции Бесселя в точке экстремума,  $\lambda$  – длина волны используемого лазерного излучения ( $\lambda = 632,8$  нм).

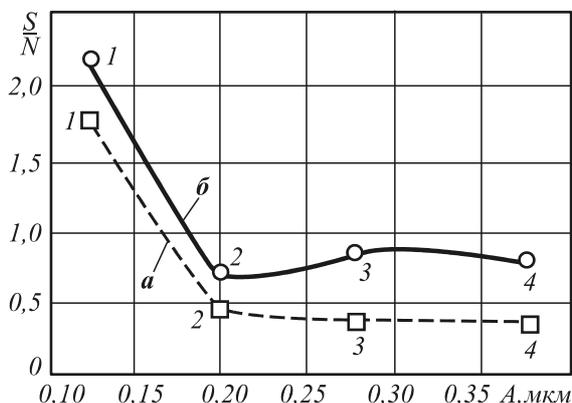


Рис. 4. График зависимости отношения сигнал/шум на спекл-интерферограмме от величины амплитудного значения колебаний на анализируемом участке лопатки: без поляризационного фильтра (а), с поляризационным фильтром (б)

Анализ графиков на рис. 4 показывает, что в результате применения поляризационного фильтра, установленного в оптическую схему ЦСИ таким образом, чтобы на светочувствительную матрицу телекамеры попадала только та часть рассеянного диффузным объектом излучения, поляризация которой совпадает с поляризацией опорной волны, на рассматриваемых участках 1, 2, 3, 4 спекл-интерферограммы, приведённой на рис. 3, отношение сигнал/шум увеличилось для различных значений амплитуды колебаний лопатки от 35% до 95%. Это соответствует увеличению видности интерференционных полос от 17% до 68%. На участке 5 соотношение сигнал/шум возросло с 1,67 до 1,98, что составляет 19%. Видность соответственно увеличилась на 11%. Таким образом, предложенный метод является эффективным экспериментальным методом улучшения качества получаемых спекл-интерферограмм для ЦСИ с гладким опорным пучком. При этом технически этот метод легко реализуем.

#### Заключение

- Разработан метод повышения отношения сигнал/шум на спекл-интерферограммах для оптических схем с гладкой опорной волной и разделёнными пучками, основанный на использовании в оптической схеме поляризационного фильтра;
- эффективность метода экспериментально подтверждена при измерении отношения сигнал/шум на различных участках спекл-интерферограммы при исследовании вибрационных ха-

рактеристик широкого спектра лопаток компрессора и турбины авиационного двигателя;

- метод позволяет повысить достоверность определения полей напряжённо-деформированного состояния объектов по полям виброперемещений и контролировать расчётные модели конструкций.

#### Литература

1. **Еленевский, Д.С.** Лазерно-компьютерная система анализа спекл-интерферограмм вибрирующих объектов / Д.С. Еленевский, Ю.Н. Шапошников // Известия Самарского научного центра РАН. – 1999. – № 1. – С. 134-136.
2. **Журавлёв, О.А.** Разработка автоматизированного метода исследования вибрационных характеристик энергоустановок / О.А. Журавлёв, С.Ю. Комаров, К.Н. Попов, А.Б. Прокофьев // Компьютерная оптика. – 2001. – Т. 21. – С. 7-11.
3. **Осипов, М.Н.** Измерение малых динамических смещений интерферометром Майкельсона со сферическими волновыми фронтами / М.Н. Осипов, М.А. Попов // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 31, № 4. – С. 55-57.
4. **Еленевский, Д.С.** Применение методов голографической и спекл-интерферометрии для исследования вибрации и шума механических конструкций: учеб. пособие / Д.С. Еленевский, О.А. Журавлёв, Ю.Н. Шапошников, Ю.Д. Щеглов, С.Ю. Комаров; под ред. В.П. Шорина. – Самара: Изд-во СГАУ, 2005. – 193 с.
5. **Джоунс, Р.** Голографическая и спекл-интерферометрия / Р. Джоунс, К. Уайкс. – М.: Мир, 1986. – 328 с.
6. **Топорец, А.С.** Оптика шероховатой поверхности / А.С. Топорец. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1988. – 191 с.

#### References

1. **Elenevsky, D.S.** Laser – computer system for vibrating objects speckl-interferograms analisys / D.S. Elenevsky, Y.N. Shaposhnikov // Proceedings of Samara Scientific Center of RF Academy of Sciences. – 1999. – N 1. – P. 134-136. – (In Russian).
2. **Zhuravlyov, O.A.** Development of a computer-aided technigue for power-plant vibration characteristics study / O.A. Zhuravlyov, S.Y. Komarov, K.N. Popov, A.B. Prokofiev // Computers Optics. – 2001. – V. 21. – P. 7-11. – (In Russian).
3. **Osipov, M.N.** Small dynamic displacements measurement with Michelson interferometer with spherical wave fronts / M.N. Osipov, M.A. Popov // Computers Optics. – 2007. – V. 31, N 4. – P. 55-57. – (In Russian).
4. **Elenevsky, D.S.** Application of holographic and speckl – interferometry for mechanic structures vibration and noise study / D.S. Elenevsky O.A. Zhuravlyov, Y.N. Shaposhnikov, Y.D. Shcheglov, S.Y. Komarov; edited by V.P. Shorin. – Samara: Samara State Aerospace University, 2005. – 193 p. – (In Russian).
5. **Jones, R** Holographic and Speckle Interferometry / R. Jones, C. Wykes. – Moscow: “Mir” Publisher, 1986. – 328 p. – (In Russian).
6. **Toporets, A.S.** Rough surface optics / A.S. Toporets. – Leningrad: “Mashinostroyenie” Publisher, Leningrad Department, 1988. – 191 p. – (In Russian).

**APPLICATION OF OPTICAL FILTER FOR INCREASE OF SIGNAL/NOISE RATIO  
IN SPECKL-INTERFEROGRAMS**

*A.I. Zhuzhukin, V.A. Solyannikov*  
*JSC «Kuznetsov», Samara*

**Abstract**

The article deals with the development of a technique for increase of signal/noise ratio in speckl-interferograms improving accuracy and trustworthiness of results obtained in the course of structural elements vibration characteristics for optic patterns with smooth base wave and separated bundles and method of its application.

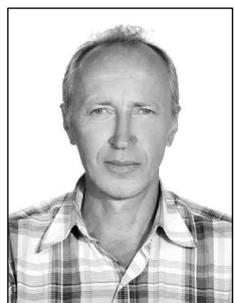
**Key words:** speckl-interferometry, laser speckle, signal/noise ratio, vibration measurement.

**Сведения об авторах**

**Жужукин Анатолий Иванович**, 1958 года рождения, инженер-конструктор ОАО «КУЗНЕЦОВ». В 1980 году окончил физический факультет Куйбышевского государственного университета, в 1986 - спецфакультет Московского физико-технического института (МФТИ). «Изобретатель СССР». Область научных интересов: виброметрия, голографическая и спекл-интерферометрия. Публикации: 18 научных трудов, 5 авторских свидетельств, 3 патента РФ.

E-mail: [cntkknio@yandex.ru](mailto:cntkknio@yandex.ru).

**Anatoly Ivanovich Zhuzhukin**, was born in 1958, design engineer of JSC «KUZNETSOV». A graduator from Kuibyshev State University, department of Physics in 1980 and a graduator of a special department of Moscow Physical – Technical Institute (MPHTI) in 1986. A word of title «USSR Inventor». Field of scientific interests: measurement of vibration, holographic and speckl-interferometry. Published works: 18 scientific works, 5 certificates of invention authorship, 3 RF patents.



**Соляников Виктор Анатольевич**, 1963 года рождения, кандидат технических наук, начальник конструкторского научно-исследовательского отделения ОАО «КУЗНЕЦОВ». В 1986 году окончил факультет «Двигатели, приборы и автоматы» Челябинского политехнического института по специальности «Динамика и прочность машин», в 1993 году защитил кандидатскую диссертацию в Самарском государственном аэрокосмическом университете. Область научных интересов: поузловая доводка ГТД по параметрам прочности, надёжности и ресурсу. Публикации: 38 научных трудов, 4 авторских свидетельства.

E-mail: [cntkknio@yandex.ru](mailto:cntkknio@yandex.ru).

**Victor Anatolevich Solyannikov**, was born in 1963, Candidate of Technical Sciences, chief of a research design department of JSC «KUZNETSOV». A graduator from Chelyabinsk Polytechnic Institute, department «Engines, apparatus and automatic machines» in 1986, specialty is «Dynamics and Strength of Machines». Defense of a thesis for degree of Candidate of Technical Sciences in Samara State Aerospace University was in 1993. Field of scientific interests: test development of gas turbine engines elements parameters in strength, reliability and service life. Published works: 38 scientific works, 4 certificates of invention authorship.

*Поступила в редакцию 2 марта 2011 г.*