

УДК 621.38

Е.А. АКСЁНОВ, А.А. ШМАТКО, В.И. ЗВОРСКИЙ, А.С. КРАВЧУК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***БЕСКОНТАКТНЫЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ  
ИЗМЕРИТЕЛЬ МАЛЫХ СМЕЩЕНИЙ**

Рассмотрен принцип измерения малых смещений шероховатых поверхностей на основе кросс-корреляционного анализа спекл-изображений, формирующихся при отражении от исследуемой поверхности когерентного излучения. Описано устройство, которое реализует данный принцип и позволяет выполнять контроль перемещений и растяжений различных поверхностей в режиме реального времени в условиях вибропомех. Описан интерфейс для работы с устройством, его возможности и особенности его работы в различных режимах.

**спекл-картина, интерференция, шероховатая поверхность, ПЗС-матрица, оптическая система, кросс-корреляционный анализ, вибропомехи, интерфейс**

**Введение**

Проблема измерения малых величин перемещений (порядка долей микрон) актуальна для современных научно-исследовательских и производственных задач. При этом желательна простота как принципа действия, так и практической реализации измерительного устройства. Анализ последних исследований и публикаций показал, что большинство существующих измерителей обладают рядом недостатков [1, 2]. Для их работы необходим либо непосредственный контакт с исследуемой поверхностью, либо нанесение на неё привязочных меток.

В данной работе представлены результаты разработки цифрового лазерного бесконтактного спекл-интерферометрического измерителя малых смещений поверхности. Необходимость создания такого устройства была связана с решением конкретной измерительной задачи: контроль деформации образца при воздействии на него статических, либо динамических нагрузок. Кроме того, при динамическом нагружении важен контроль вибрации, которая вносит погрешность в результаты измерений.

Применение современных цифровых и компьютерных технологий для решения данной задачи обеспечит выполнение измерений и контроль де-

формаций в режиме реального времени и сохранение результатов измерений в удобном для анализа и дальнейшей обработки виде [3]. Кроме того, применение цифровой техники делает возможным создать портативное устройство, при этом массо-габаритные характеристики устройства определяются в основном характеристиками оптической системы.

**1. Применение свойств спекл-картин для контроля перемещения поверхности**

Работа данного устройства основана на особенности лазерного излучения, которая была обнаружена вслед за изобретением лазеров. Особенность состоит в том, что при отражении от шероховатой поверхности когерентный луч формирует на экране сложную гранулярную структуру (рис. 1).

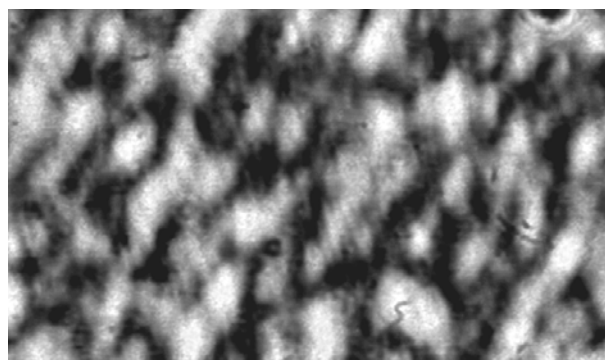


Рис. 1. Спекл-картина

Такая структура получила название «спекл-картина» (от англ. «speckle» – зёрнышко, пятнышко). Спекл-картина не имеет непосредственной связи с реальным изображением освещенной поверхности. Основной вклад в формирование спекл-изображения вносят малые участки поверхности с центрами в зеркально отражающих точках [1, 4].

Рассмотрим поверхность, освещенную лазером (рис. 2).

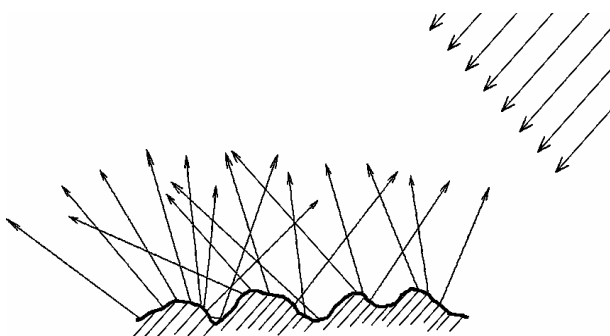


Рис. 2. Отражение лазерного излучения от шероховатой поверхности

Каждый отдельный элементарный участок поверхности расположен под своим углом относительно падающего луча, следовательно, отражение в каждой точке будет происходить под разными углами. Таким образом, отраженная волна состоит из «вкладов» от большого числа миниатюрных поверхностей, каждую из которых можно считать независимой рассеивающей областью. В каждой точке в пространстве будет происходить наложение некоторого количества отраженных лучей.

Пусть в пространстве перед исследуемой поверхностью расположена некоторая плоскость наблюдения, т.е. экран. В каждой точке экрана рассеянные компоненты складываются каждый со своей фазой. Рассмотрев элементарный участок поверхности (рис. 3, а), увидим, что лучи, отраженные от соседних точек, проходят в пространстве разный путь. Это означает, что на плоскость наблюдения отраженные лучи приходят с разными фазами.

Когда в одну точку экрана попадают несколько лучей со своими фазами, интерференция этих волн

приводит к тому, что точка оказывается освещенной с суммарной интенсивностью (рис. 3, б).

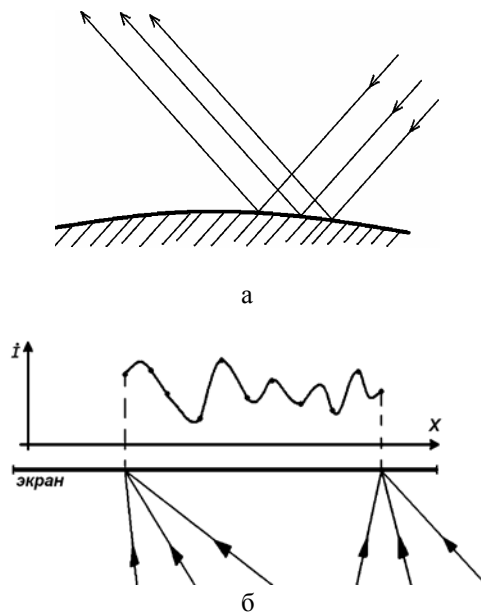


Рис. 3. Формирование спекл-картины

С переходом от точки к точке экрана плавно изменяется соотношение фаз, а значит и суммарная интенсивность, формируется спекл-картина (рис. 1).

Таким образом, спекл-изображение представляет собой интерференционную картину нерегулярных волновых фронтов на экране, образующуюся при падении когерентного излучения, отраженного от шероховатой поверхности.

При смещении исследуемой поверхности в своей плоскости на некоторую величину, меньшую диаметра луча лазера, происходит смещение отраженных лучей в направлении смещения поверхности. В результате спекл-картина практически не изменяется [3], а смещается по экрану на расстояние, соответствующее смещению исследуемой поверхности.

Если фиксировать эти спекл-картины для дальнейшего корреляционного анализа, по полученным данным можно судить о величине и направлении смещения исследуемой поверхности [1].

## 2. Описание установки

Применение цифровых технологий обработки данных позволило в качестве плоскости наблюдения

использовать ПЗС-матрицу, чтобы спекл-картина формировалась непосредственно на ней (рис. 4).

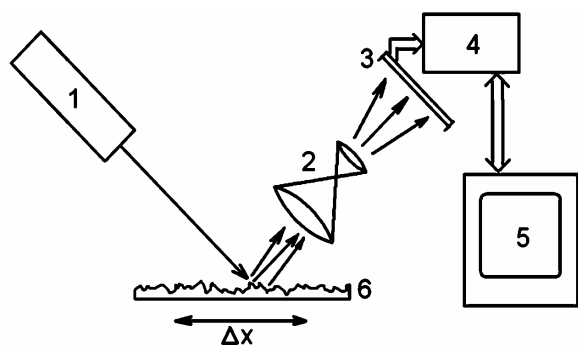


Рис. 4. Схема экспериментальной установки:

- 1 – лазерный модуль;
- 2 – оптическая система;
- 3 – ПЗС матрица;
- 4 – устройство обработки;
- 5 – персональный компьютер;
- 6 – исследуемая поверхность

Для повышения разрешающей способности измерителя следует направить отраженные от поверхности 6 лучи на ПЗС-матрицу 3 через оптическую систему 2, чтобы обеспечить поперечное увеличение. Это позволяет добиться разрешающей способности, соизмеримой с длиной волны лазерного излучения (0,6328 мкм).

Спекл-изображение, сформированное на ПЗС-матрице, считывается устройством обработки 4, которое производит кросс-корреляционный анализ двух соседних по времени кадров. Если между двумя кадрами происходило смещение исследуемой поверхности, то по коэффициенту корреляции устройство определяет величину и направление смещения поверхности. Данные о смещении поверхности передаются в персональный компьютер для дальнейшей обработки.

Для наблюдения за несколькими точками исследуемой поверхности к устройству обработки следует подключить дополнительные ПЗС-матрицы со своей оптической системой и лазерным модулем. Таким образом, возможен поточечный контроль растяжения или сжатия исследуемой поверхности между заданными точками.

Функциональная схема устройства изображена на рис. 5.

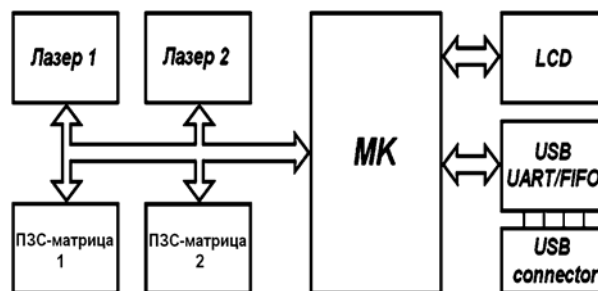


Рис. 5. Функциональная схема устройства

Микроконтроллер (МК) производит считывание изображений с ПЗС-матриц и выполняет их обработку. Текущая величина перемещения вдоль координат  $x$  и  $y$  отображается на LCD-дисплее. Кроме того, отображаются данные об изображении, информация о состоянии устройства и режиме его работы.

МК передает данные в персональный компьютер. Среди существующих в настоящее время интерфейсов наибольшее распространение получил интерфейс USB. Для связи МК с персональным компьютером по USB-интерфейсу применена микросхема виртуального COM-порта. Питание устройство получает по шине USB. При использовании лазерных модулей малой мощности возможно их питание от устройства.

### 3. Интерфейс измерителя

Интерфейс программы изображен на рис. 6. В главном окне программы отображены графики перемещения по координатам и траектории движения исследуемой поверхности.

Кроме того, отображается дополнительная информация: качество изображения (определяется по количеству отличных от общего фона элементов изображения) и яркость изображения (средняя и максимальная яркость пикселей). Эти данные характеризуют правильность расположения устройства относительно исследуемой поверхности. Их необходимо контролировать во время работы устрой-

ства, чтобы судить о достоверности получаемых результатов.

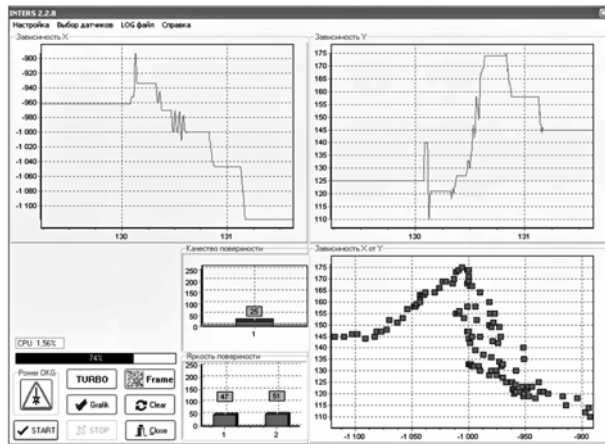


Рис. 6. Интерфейс программы

В исходном состоянии доступны только настройки программы: выбор режима работы, настройки порта и выбор калибровочного коэффициента. Этот коэффициент предусмотрен для случая, когда в устройстве применяются разные оптические системы для работы с разной разрешающей способностью. Устройство вычисляет только перемещение изображения по ПЗС-матрице. Поэтому все данные передаются в «пикселях». Калибровочный коэффициент («мкм/пиксел») необходим для преобразования величин перемещения в микроны и для удобства дальнейшей обработки результатов измерений.

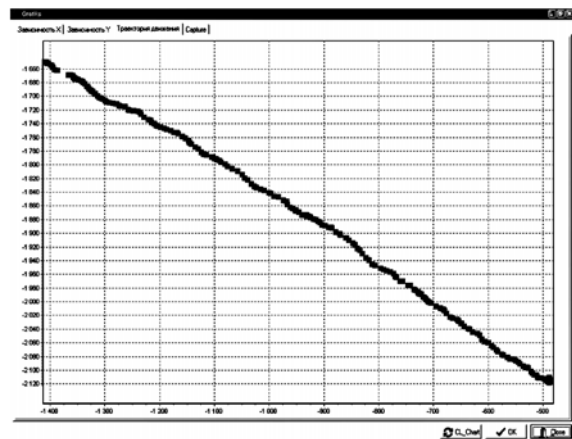
Работа с устройством начинается после соединения программы с портом компьютера, к которому подключено устройство. Программа переходит в рабочий режим, становятся активными кнопки управления устройством.

Перед выполнением измерений необходимо включить питание лазеров и запустить процесс обмена данными с устройством и построения графиков. Все данные, получаемые от устройства, отображаются на графиках с учетом калибровочного коэффициента. Кроме того, данные сохраняются в LOG-файлы для возможности дальнейшего анализа.

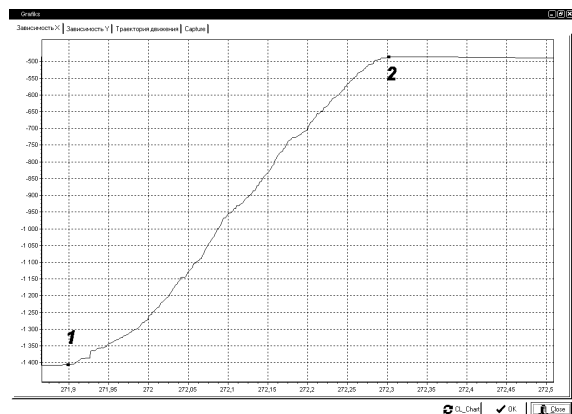
Построение графиков происходит непрерывно, возможна очистка графиков и остановка процесса их построения. Из главного окна программы в рабо-

чем режиме можно открыть окно «Graphics», в котором графики отображаются в отдельных закладках во весь экран.

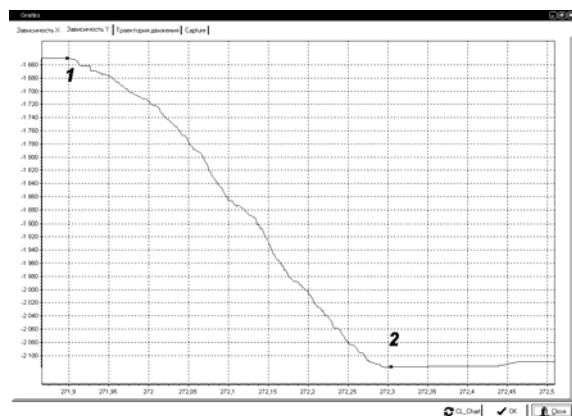
На рис. 7 изображены графики с отображением линейного (с вибрациями) перемещения поверхности.



а



б



в

Рис. 7. Окно графиков

На рис. 7, а изображен график траектории перемещения исследуемой поверхности, а точнее контрольной точки на ней. На рис. 7, б, в изображены

графики перемещения исследуемой поверхности относительно координат  $x$  и  $y$ . На рисунках четко прослеживаются моменты начала перемещения (1) и его окончания (2). Крутизна в каждой отдельной точке графика определяет скорость перемещения в соответствующий момент времени.

Для повышения частоты опроса устройства предусмотрен режим «Turbo». В этом режиме отключаются дополнительные функции, что позволяет ускорить работу микроконтроллера.

Кроме рабочего режима программа может работать в режиме просмотра изображения спекл-картины с ПЗС-матрицы. Этот режим становится активным по нажатию кнопки «Frame» в главном окне программы. При этом приостанавливается вывод графиков, изображение отображается в закладке «Capture» окна графиков (рис. 8). Этот режим позволяет оценить правильность юстировки оптики при установке устройства.

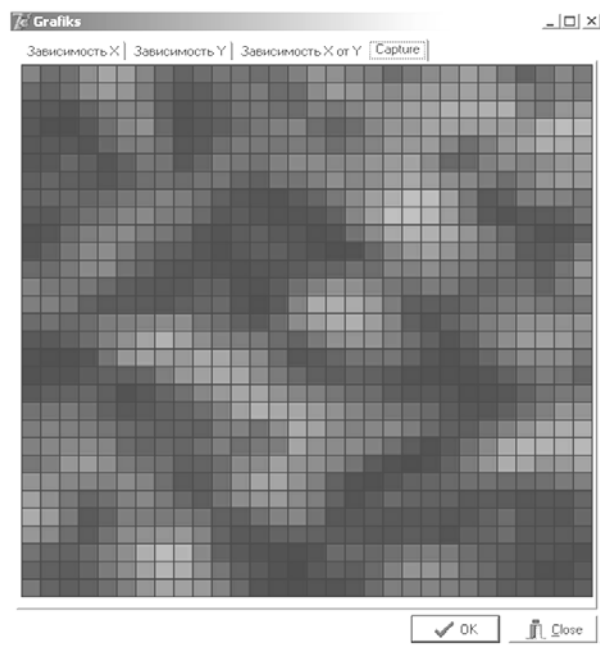


Рис. 8. Программа в режиме просмотра изображения

### Заключение

В результате выполненной работы были проведены исследования возможностей использования

спекл-картин и их свойств для решения задач контроля перемещений и растяжений различных поверхностей. Разработан цифровой бесконтактный спекл-интерферометрический измеритель малых смещений шероховатой поверхности, который позволяет выполнять измерения в режиме реального времени в условиях вибропомех.

Разработан интерфейс для работы с устройством. Он позволяет управлять устройством, обрабатывает полученные данные, строит соответствующие графики и сохраняет результаты измерений для дальнейшей их обработки.

Испытания устройства показали возможность прецизионных измерений в условиях вибропомех с частотой до 3000 Гц. Достигнута разрешающая способность измерений порядка 6 мкм.

Планируется усовершенствование устройства и программного обеспечения. С целью повышения чувствительности устройства будут проведены испытания с применением оптических систем, имеющих большее поперечное увеличение.

### Литература

1. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 328 с.
2. Кучин А.А., Обрадович К.А. Оптические приборы для измерения шероховатости поверхности. – Л.: Машиностроение, 1981. – 197 с.
3. Базылев Н.Б., Лавинская Е.И., Фомин Н.А. Лазерная цифровая спекл-анемометрия течений в микроканалах РЕМ-топливных элементов // Инженерно-физический журнал. – 2006. – Т. 79, № 6. – С. 176-189.
4. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976. – 928 с.

Поступила в редакцию 7.02.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.К. Волосюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.