

УДК 621.373

**Е.В. Бурнаевская,  
В.Н. Гришанов**

Самарский государственный  
аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский  
университет) (СГАУ)  
Московское шоссе, 34  
г. Самара, Россия,  
443086  
vladgrishanov@yandex.ru

## **ПРИМЕНЕНИЕ СТРУКТУРИРОВАННЫХ В ПРОСТРАНСТВЕ И ВРЕМЕНИ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В ВИБРОМЕТРИИ**

*Разработаны лазерные измерители виброперемещений, позволяющие одновременно фиксировать три пространственные компоненты перемещений поверхности – две угловые и одну поступательную. Для измерения угловых компонент перемещений используется зеркальная составляющая отраженного поверхностью излучения, а поступательной – диффузная. Импульсно-периодический режим работы лазера обеспечивает измерение частоты вибраций. Показано, что применение в виброметрах структурированных в пространстве и времени лазерных пучков, повышает быстродействие виброметров и расширяет номенклатуру измеряемых параметров.*

**Ключевые слова:** виброметрия, импульс, лазер, перемещение, поперечная структура лазерного пучка, временная структура лазерного пучка

### **1 Введение**

Механические колебательные процессы имеют большое значение в современной технике, применительно к которой многие виды механических колебаний называют вибрацией. Наличие таких колебаний может отражать исправное функционирование механизма (перемешивание и утрямбовка бетона, транспортировка и сортировка сыпучих тел, подача мелких деталей в поточном производстве, измельчение породы, забивка свай, вибропрокат, вибропрессование, виброочистка, виброабразивное упрочнение, бурение скважин и т.д. и т.п.), а может быть нежелательным и даже опасным явлением, сопровождающим его эксплуатацию (виброразрушение и износ, разъюстировка и шумы, профессиональные заболевания и т.д. и т.п.). Соответственно этому говорят о вибрации полезной или вредной. Во всех случаях как при полезном применении вибраций, так при борьбе с ней необходимо располагать экспериментально полученной информацией о параметрах, характеризующих вибрацию [1].

Бесконтактные оптические методы измерения вибраций выгодно отличаются от контактных отсутствием механической связи и, следовательно, влиянием зонда или датчика на объект измерений и измеряемые

параметры. Из известных трех групп оптических методов измерения вибраций: доплеровских, голографических и зеркальных, последние отличаются относительной простотой приборного обеспечения и интерпретации результатов, а также широким диапазоном измеряемых частот и амплитуд вибраций.

Траектория движения элемента колеблющейся поверхности содержит ценную информацию об особенностях колебательной системы и внешних воздействиях [2]. Так статистический анализ траекторий вершины режущего инструмента в трехмерном пространстве может помочь определить слабые области рабочего пространства станка, задать направления поиска недостатков его конструкции. Сравнивая характеристики траекторий, полученных в одинаковых условиях резания на разных станках, можно выявить причины разного качества получаемых поверхностей [3]. Передача вибрационных возмущений по механической структуре машины осуществляется упругими продольными и поперечными волнами (изгибными, сдвиговыми и пр.) [4].

Идентификация форм колебаний элементов конструкций требует измерений виброперемещений по нескольким пространственным координатам в последовательной или параллельной

постановке эксперимента [5]. Естественно, что параллельная постановка эксперимента возможна лишь при использовании многокомпонентных измерителей. Авторами были предложены два оригинальных лазерных измерителей виброперемещений, в которых реализован зеркальный метод [6], [7]. Источником измерительной информации являются диффузная и зеркальная компоненты отраженного от вибрирующей поверхности излучения.

Виброметры позволяют измерять параллельно две угловые и одну поступательную координаты элемента колеблющейся поверхности исследуемого объекта, а последний вариант [7] - также частоты колебаний. Оценке параметров и погрешностей последнего варианта виброметра и посвящена настоящая работа.

## 2 Структура лазерного виброметра

Структурная схема виброметра представлена на рисунке 1. Назначение основных элементов и их взаимосвязи ясны из рисунка. Полупрозрачная пластина 2 служит для совмещения приёмного и передающего каналов. Полупрозрачная пластина 3 с матовой 4 и зеркальной 5 поверхностями закрепляется на объекте 14 матовой стороной 5 к вибрирующей поверхности.

Если в отраженном от колеблющегося объекта излучении содержатся достаточные для работы фотоприёмных устройств интенсивности диффузной и зеркальной компоненты, то она вообще не нужна, например, для окрашенного металлического проката. Телекамера 6 с объективом 7 и матричным фотоприёмником 8 образуют канал измерения угловых виброперемещений по зеркальной компоненте. Здесь матрица 8 устанавливается в фокальной плоскости объектива 7 для преобразования угловых перемещений в линейные.

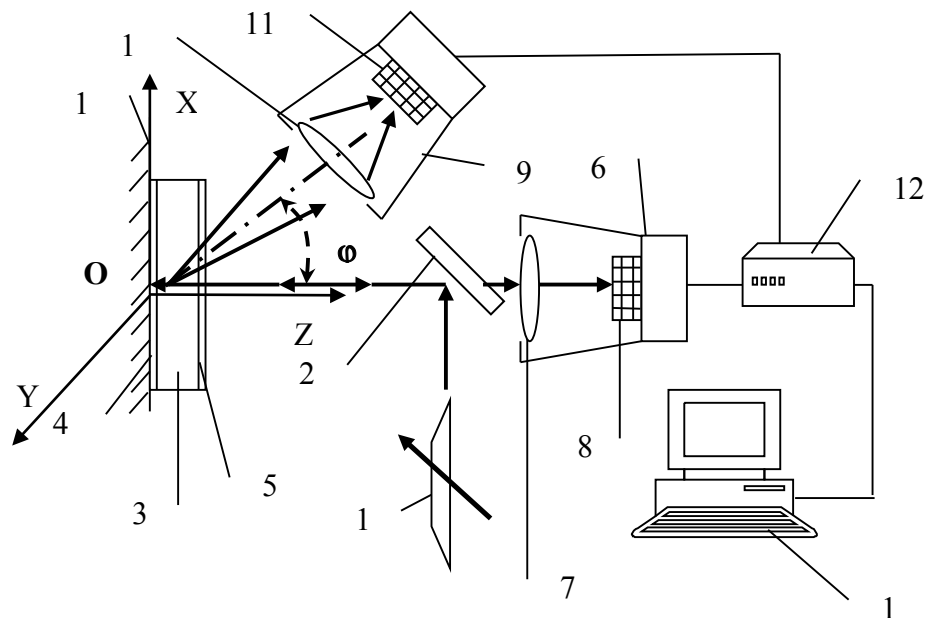


Рисунок 1. Структурная схема лазерного измерителя угловых и линейных виброперемещений: 1 – лазер с регулируемой частотой следования импульсов; 2, 3 - полупрозрачные пластины; 4 – матовая поверхность; 5 – зеркальная поверхность; 6, 9 – телекамеры; 7, 10 – объективы; 8, 11 – матричные фотоприёмники; 12 – двухканальное устройство сопряжения; 13 – ПЭВМ; 14 – вибрирующая поверхность

Телекамера 9 со своим объективом 10 и фоточувствительной матрицей 11 образуют канал измерения поступательных виброперемещений в направлении падающего пучка широко распространенным триангуляционным методом [8]. Фоточувствительная матрица 11 телекамеры 9 установлена на расстоянии резкого изображения от объектива 10 пятна лазерного излучения на матовой поверхности 4. Оптическая ось телекамеры 9 составляет некоторый известный угол  $\varphi$  с полупрозрачной пластиной 3 и вибрирующей поверхностью 14, значение которого определяется расстоянием до поверхности 14 и амплитудой ее виброперемещений.

Таким образом, телекамера 6 фиксирует преимущественно зеркальную компоненту и служит датчиком угловых виброперемещений, в то время как телекамера 9 фиксирует преимущественно диффузную компоненту и служит датчиком поступательных виброперемещений. В результате в поле зрения каждой из телекамер, а, следовательно, и во введенном в ПЭВМ изображении с каждой из телекамер присутствует изображение лишь одного пучка, что существенно упрощает их обработку. Причем в подобной установке чувствительность к угловым перемещениям не зависит от чувствительности к поступательным.

Хотя в поле зрения телекамеры 6 присутствует диффузная компонента, но: а) она дефокусирована; б) её уровень для многих реальных поверхностей – проката, например, – много ниже зеркальной; в) то же достигается при использовании вспомогательной полупрозрачной пластины, фиксируемой на объекте, за счет оптимизации её отражательных свойств. Все три приведенные причины указывают на то, что интенсивность диффузной компоненты на фоточувствительной матрице телекамеры зеркального канала может быть снижена до уровня, когда легко осуществима амплитудная селекция зеркальной компоненты. Тут возможна и пространственная селекция, т.к. для

получения высокой чувствительности к поступательным перемещениям необходимо работать с увеличением большим 1 в диффузном канале. При расположении же фоточувствительной матрицы зеркального канала в фокальной плоскости объектива изображение создаваемое диффузной компонентой на ней всегда будет оставаться в центре. Наличие устройства сопряжения и ПЭВМ позволяет автоматизировать измерения амплитуд угловых и поступательных виброперемещений по изображениям. Элементы 1, 2 совместно с 6 – 11 обычно объединяются в единый оптико-механический блок.

### 3 Оценка погрешностей лазерного виброметра

Оптико-механический блок юстируется так, чтобы коллимированное излучение падало перпендикулярно зеркальной поверхности 5 полупрозрачной пластины 3. Тогда отраженное зеркальной поверхностью 5 полупрозрачной пластины 3 излучение будет распространяться вдоль оптической оси телекамеры 6 (телекамеры зеркального канала). Оптическая ось телекамеры 9 (диффузного канала) выставляется под заданным углом  $\varphi$  к нормали, восстановленной к вибрирующей поверхности.

Зеркальная компонента отраженного полупрозрачной пластиной 3 коллимированного излучения собирается объективом 7 телекамеры 6 на фоточувствительной площадке матричного фотоприёмника 8. Расположение фоточувствительной площадки матричного фотоприёмника 8 в фокальной плоскости объектива 7 позволяет преобразовывать угловые перемещения отраженного зеркальной поверхностью 5 полупрозрачной пластины 3, вызванные вибрациями, в смещения фокального пятна по фоточувствительной площадке матричного фотоприёмника, пропорциональные фокусному расстоянию объектива 7. Нормальное падение отраженного от

полупрозрачного зеркала 2 лазерного пучка на вибрирующую поверхность и перпендикулярность оптической оси объектива 7 к той же поверхности обеспечивает одинаковую чувствительность к угловым перемещениям поверхности 14 относительно двух взаимно перпендикулярных осей, лежащих в ее плоскости.

При наличии угловых колебаний поверхности 14 траектория лазерного пучка в фокальной плоскости объектива 7 будет описывать одну из фигур Лиссажу, которая при выборе частоты следования импульсов лазера 1 кратной частоте угловых колебаний распадется на систему точек. Размах фигур Лиссажу, рассчитанный ПЭВМ 13 по оцифрованным устройством сопряжения 12 изображениям при известном фокусном расстоянии объектива 7, и даст значения амплитуд угловых виброперемещений поверхности 14. Количество точек, на которые разбивается фигура Лиссажу, позволяет определить частоты угловых колебаний, в чём и проявляется преимущество структурированного во времени лазерного пучка в форме коротких импульсов излучения с перестраиваемым периодом следования.

Поступательные виброперемещения поверхности 14, имеющие отличную от нуля компоненту в направлении падающего лазерного пучка, вызовут перемещения изображения его следа на матовой поверхности 4 полупрозрачной пластины 3 по поверхности матричного фотоприёмника телекамеры 9. При высокой частоте виброколебаний по сравнению с кадровой частотой телекамеры изображение следа будет иметь форму отрезка. Длина отрезка вместе с известным углом  $\varphi$  и параметрами объектива 10 являются исходными данными для расчета амплитуды линейных виброперемещений в направлении оптической оси падающего на поверхность лазерного пучка с помощью ПЭВМ 13. При этом длина отрезка определяется по оцифрованным устройством сопряжения 12 изображениям также с использованием

ПЭВМ 13. Выбор частоты следования импульсов лазера 1 кратной частоте поступательных виброперемещений, также приведёт к разбиению отрезка на систему точек, количество которых при известной частоте следования импульсов лазерного излучения позволит определить частоту поступательных вибраций исследуемого участка поверхности.

При перемещении поверхности объекта 14 в направлении оптической оси падающего пучка на расстояние  $h$  перемещение пятна в пространстве предметов объектива 10 телекамеры 9 составит  $v$ . В случае плоской поверхности перемещения  $h$  и  $v$  связаны простым соотношением:

$$h = v \cdot \operatorname{ctg} \varphi; \quad (1)$$

которое и является исходным для оценки погрешности измерения амплитуды поступательных виброперемещений. Соотношение (1) следует из рассмотрения рисунка 2.

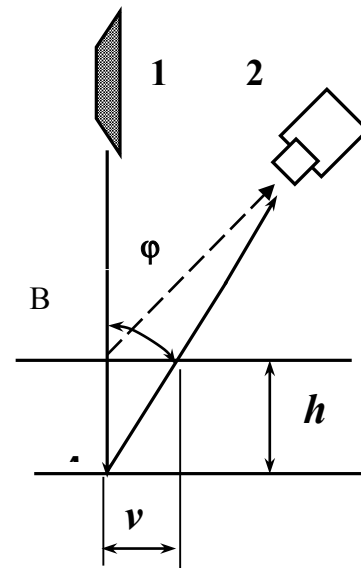


Рисунок 2. Геометрия измерения поступательных перемещений: 1 – лазерный модуль; 2 – телекамера канала поступательных перемещений; А – положение пятна излучения на поверхности в начальном её положении; В – положение пятна на смещённой поверхности;  $h$  – смещение поверхности;  $v$  – смещение пятна в поле предметов;  $\varphi$  – угол между оптическими осями лазерного пучка и объектива телекамеры

Абсолютная погрешность метода измерений поступательных перемещений, как погрешность косвенных измерений, стандартно описывается следующим выражением, учитывающим вклад двух составляющих, первая из которых обусловлена измерением смещения лазерного пятна по вибрирующей поверхности, а вторая – погрешностью установки угла между оптическими осями зондирующего пучка и объектива 10 телекамеры 9:

$$\Delta h = \sqrt{2\left(\frac{\partial h}{\partial v} \Delta v\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial \varphi} \Delta \varphi\right)^2} = \sqrt{2 \cdot \text{ctg}^2 \varphi \cdot \Delta v^2 + \frac{v^2}{\sin^4 \varphi} \Delta \varphi^2} \quad (2)$$

где  $\Delta v$  – абсолютная погрешность измерения смещения лазерного пятна по поверхности объекта;  $\Delta \varphi$  – абсолютная погрешность измерения угла между оптическими осями телекамеры и коллимированного лазерного пучка. Поскольку поступательное перемещение объекта измеряется по двум положениям лазерного пятна на его поверхности, то слагаемое, обусловленное погрешностью  $\Delta v$  входит в выражение (2) с коэффициентом 2.

Корректнее качество результатов измерений характеризует не абсолютная величиной погрешности  $\Delta h$ , а ее отношение к измеряемой величине  $\Delta h/h$  – относительная величина ошибки. Воспользовавшись определением относительной погрешности и подставив (1) в (2), получим выражение для относительной погрешности:

$$\frac{\Delta h}{h} = \sqrt{2\left[\left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{2} \cdot \Delta \varphi}{\sin 2\varphi}\right)^2\right]} \quad (3)$$

Оценим вклад каждого слагаемого выражения (3) в искомую погрешность. Т.к. это выражение представлено в относительных единицах, то первое

слагаемое  $(\Delta v/v)^2$ , которое в данном случае характеризует предметную область, можно перевести в плоскость изображений – плоскость матричного фотоприемника. Геометрические искажения, вносимые объективом телекамеры, с одной стороны, должны являться предметом самостоятельного исследования и, с другой стороны, оставаясь жесткими, они компенсируются на этапе обработки изображений [9]. Тогда выражение (3) примет следующий вид:

$$\frac{\Delta h}{h} = \sqrt{2\left[\left(\frac{\Delta w}{w}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{2} \cdot \Delta \varphi}{\sin 2\varphi}\right)^2\right]} \quad (4)$$

где  $\Delta w$  – погрешность измерения координат энергетического центра изображения лазерного пятна на фоточувствительной площадке матричного фотоприемника; а  $w$  – смещение координат энергетического центра изображения пучка на фоточувствительной матрице. Погрешность измерения координат энергетического центра изображения лазерного пятна на фоточувствительной площадке матричного фотоприемника  $\Delta w$  зависит от разрешающей способности фоточувствительной ПЗС-матрицы телекамеры, алгоритма обработки изображений и условий проведения эксперимента.

Опираясь на результаты работы [10], можно говорить о том, что погрешность измерения координат при подсветке контролируемой поверхности объектов с изотропной структурой в производственных условиях составляет в среднем 0,2 пк. В других источниках [11], можно найти данные, что при оптимизации значений мощности излучения и использовании оптических схем с дополнительным опорным пучком, удается достичь пространственного разрешения, исчисляемого сотыми долями размера одного фоточувствительного элемента матричного фотоприемника, в частности, равного 0,02 пк.

Высокоразрешающие ПЗС-матрицы телекамер дают число элементов разложения

изображения  $1300 \times 1030$  пк [12]. В цифровых фотоаппаратах это число может достигать 22 мегапикселей и при отношении сторон  $2/3$  получается почти 4000 элементов в одной строке. В последнем случае, при  $\Delta w = 0,2$  и  $w = 4000$ , относительная погрешность в измерении координат может быть минимизирована до значения  $(\Delta w/w)^2 = 2,5 \cdot 10^{-9}$ . Среднеразрешающие телекамеры, например, телекамера SK-1004 имеет число элементов разложения  $576 \times 360$  [13], что дает  $(\Delta w/w)^2 = 3,086 \cdot 10^{-7}$ .

Для измерения угла между осью диаграммы направленности лазерного пучка и оптической осью телекамеры  $\varphi$  можно использовать теодолит. Теодолиты изготавливают со средней квадратической ошибкой при измерении горизонтальных углов от  $0,5''$  (у высокоточных) до  $30''$  (у технических) [14]. Если взять за основу теодолит средней точности 2Т2, для которого  $\Delta\varphi = 2'' = 9,696 \cdot 10^{-6}$  рад, то при измерении с его помощью угла  $\varphi$  теодолитом типа 2Т2, получаем  $[2(\Delta\varphi / \sin\varphi)^2] = 1,88 \cdot 10^{-10}$ . Для технического теодолита при  $\Delta\varphi = 30'' = 1,454 \cdot 10^{-4}$  рад и  $[2(\Delta\varphi / \sin\varphi)^2] = 4,228 \cdot 10^{-8}$ . Следовательно, для любого фотоприемного устройства можно подобрать соответствующий угломер, чтобы вклад погрешности измерения угла падения коллимированного пучка не превышал погрешности измерения координат энергетического центра изображения пучка.

Поскольку из сильного неравенства:

$$(\Delta w/w)^2 \gg [(2^{0,5} \cdot \Delta\varphi) / \sin 2\varphi]^2 \quad (5)$$

следует, что измерения практически всегда можно выполнять в условиях, когда погрешность координат энергетического центра изображения будет превалировать, то интервал относительных погрешностей будет иметь границы:

$$\Delta h/h = 2^{0,5} (\Delta w/w), \quad (6)$$

что для 22-мегапиксельной телекамеры даёт  $3 \cdot 10^{-4}$  и  $10^{-3}$  – для среднеразрешающей.

Откуда видна нерациональность использования высокоразрешающих телекамер, т.к. увеличение числа пикселей изображения с  $576 \times 360 = 0,2$  Мпк до 22 Мпк приводит лишь к трёхкратному снижению погрешности измерения при возрастании объема обрабатываемой информации на два порядка. Более рациональный путь состоит в поиске и синтезе оптических схем, не требующих фотоприемников с предельным пространственным разрешением, и алгоритмов субэлементного разрешения.

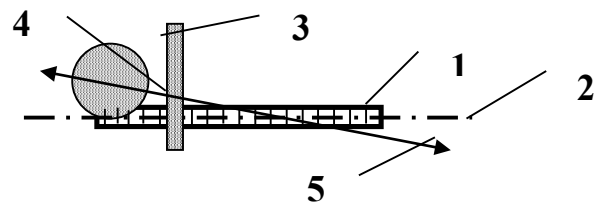


Рисунок 3. Погрешности настройки триангуляционной ЛСИГП: 1 - фоточувствительная линейка; 2 - центровая линия линейки; 3 - структурированный лазерный пучок в форме отрезка; 4 - коллимированный лазерный пучок; 5 - траектория перемещения изображения лазерного пучка при смещении объекта измерения

При измерении поступательных виброперемещений возможно использование высокого пространственного разрешения без значительного увеличения количества обрабатываемых элементов изображения. Как упоминалось выше, траектория изображения лазерного пятна на диффузной вибрирующей поверхности представляет собой отрезок прямой, поэтому для измерения длины этого отрезка достаточно линейного, а не матричного фотоприёмника. Современные ПЗС или КМОП линейки содержат до 4096 и более элементов на одном кристалле, т.е.  $(\Delta h/h) \sim 10^{-4}$  будет выполняться с опросом всего  $10^4$  элементов, что позволяет измерять параметры колебания шпинделей станков в реальном масштабе времени [15].

При воплощении канала измерения поступательных виброперемещений следует учитывать скрещенность оптических осей лазера и фотоприёмного устройства и отклонение траектории перемещения изображения лазерного пучка от центральной

линии фотоприёмной линейки. Рисунок 3 демонстрирует преимущество структурированного лазерного пучка в форме отрезка по сравнению с традиционной формы пучка.

#### **4 Перспективные области применения и элементная база многокомпонентного лазерного виброметра**

Зеркальные методы конкурентоспособны с интерферометрическими в области относительно больших перемещений по сравнению с длиной волны зондирующего электромагнитного излучения оптического диапазона. Поэтому рассматриваемый многокомпонентный лазерный виброметр предназначен, в первую очередь, для измерения виброперемещений оболочечных элементов: кожухов двигателей, стенок газо- и гидропроводов, где поступательные перемещения имеют величину  $\sim 1$  мм, а угловые достигают  $5^\circ$ .

Относительные высокие амплитуды измеряемых виброперемещений приводят к оценке дистанции до оптико-механического блока прибора в 35 – 120 мм, которая, в первую очередь, определяется требуемым увеличением  $\sim 10$  в канале измерения поступательных перемещений исходя из характерного линейного размера современной фоточувствительной матрицы или линейки  $\sim 10$  мм и измеряемого перемещения  $\sim 1$  мм. Здесь, с учётом переменной дистанции, оптимально использовать короткофокусные объективы с переменным фокусным расстоянием, например, типа CANON EF 11-24 mm F/4.0L USM.

Максимальная дистанция в 120 мм позволяет и для измерения угловых виброперемещений с размахом в  $5^\circ$  использовать серийные объективы с входной апертурой 10 мм и более. Требуемое фокусное расстояние объектива канала измерения угловых виброперемещений составит  $\sim 100$  мм.

Предложений по камерам с матричными и линейными фоточувствительными

датчиками сейчас очень много. Неплохие параметры демонстрируют камеры белорусской фирмы ОРМИНС. Во-первых, эти камеры позиционируются, как измерительные; во-вторых, совокупность параметров, заявляемая производителем, легко пересчитывается в погрешности измерения в предметной области их конкретного применения.

Учитывая невысокие требования к когерентности излучения в зеркальных методах измерения вибраций и небольшие расстояния от прибора до объекта, вполне обоснованным представляется использование в описываемом виброметре лазерных модулей на основе полупроводниковых лазеров с мощностью излучения  $\sim 1$  мВт. В них удачно сочетаются такие технические и эксплуатационные параметры, как структура поперечного сечения пучка, низковольтное электропитание, надёжность полупроводниковой электроники, прямая модуляция мощности излучения током накачки, низкая стоимость.

В каталогах фирм производителей оптико-электронных компонентов, как правило, присутствуют лазерные модули со структурированным лазерным пучком в форме отрезка прямой, например, LG-H635-4-5, лазерные модули с внешней импульсной модуляцией мощности излучения, например, KLM-M650-4-5 с максимальной частотой модуляции 500 кГц и т.п. Их спектр излучения принадлежит видимому диапазону, что обеспечивает удобство позиционирования прибора по отношению к объекту, хотя при необходимости можно подобрать аналоги, излучающие в инфракрасном диапазоне. Здесь следует отметить, что мощность излучения практически любого полупроводникового лазера легко модулируется током накачки до частот в десятки мегагерц, чем и решается задача измерения вибраций механических конструкций многокомпонентным лазерным виброметром.

## 5 Заключение

Предложена оптическая схема лазерного виброметра, которая позволяет одновременно измерять три компоненты виброперемещений – две угловые и одну поступательную, а также их частоты. Для измерения поступательных смещений вибрирующей поверхности используется диффузная компонента отраженного ею излучения, а угловых – зеркальная. Пространственные координаты отраженного излучения фиксируются двумя многоэлементными фотоприёмниками, по выходным сигналам которых и рассчитываются перемещения методами обработки изображений.

Показано, что использование структурированного в пространстве лазерного пучка, форма поперечного сечения которого представляет собой отрезок, упрощает юстировку оптико-механического блока относительно вибрирующей поверхности. Структурированное во времени лазерное излучение в форме коротких импульсов с регулируемой частотой следования делает возможным измерение частот пространственных компонент вибраций вплоть до десятков и сотен мегагерц.

Оптико-механический блок лазерного виброметра при использовании современных твердотельных матричных фотоприёмников и лазерных модулей с полупроводниковыми лазерами получается компактным и технологичным в изготовлении и применении.

Работа выполнена при государственной поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации мероприятий Программы повышения конкурентоспособности СГАУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013-2020 годы.

## Список использованных источников

[1] Иориш, Ю.И. Виброметрия. Измерение вибрации и ударов. Общая теория, методы и приборы

[Текст] / Ю.И. Иориш – М.: Машиностроение, 1963. – 773 с.

[2] Добрынин, С.А. Методы автоматизированного исследования вибрации машин: Справочник [Текст] / С.А. Добрынин, М.С. Фельдман, Г.И. Фирсов – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.

[3] Козочкин, М.П. Аттракторы при резании и перспективы их использования в диагностике [Текст] / М.П. Козочкин, Ф.С. Сабилов // Измерительная техника, 2009. - № 2. – С. 37 – 41.

[4] Шахматов, Е.В. Комплексное решение проблем динамики и виброакустики [Электронный ресурс] / Е.В. Шахматов // Динамика и виброакустика, 2014. - № 2. – С. 1 – 10.

[5] Сабилов, Ф.С. Диагностика станков с использованием трёхкомпонентных датчиков вибрации [Текст] / Ф.С. Сабилов // Контроль. Диагностика, 2012. - № 12. – С. 66 – 72.

[6] Гришанов, А.В. Лазерный измеритель амплитуды угловых и линейных виброперемещений [Текст] / А.В. Гришанов, В.Н. Гришанов – Патент РФ № 2324906 С2, М.кл. G01H 9/00. Бюл. 20.05.2008, № 14.

[7] Гришанов, В.Н. Лазерный измеритель амплитуд и частот линейных и угловых виброперемещений. [Текст] / В.Н. Гришанов, Е.В. Гришанова, И.Р. Нигматулин, Ю.А. Христофорова. - Патент на полезную модель РФ № 121567 U1, М.кл. G01H 9/00. Бюл. 27.10.2012, № 30.

[8] Дёмкин, В.Н. Лазерные технологии при измерении геометрии поверхности сложной формы (обзор) [Текст] / В.Н. Дёмкин, В.Е. Привалов. - Вестник СПбО АИН. Вып. 5. – СПб.: СПбГПУ, 2008. – С. 138 – 187.

[9] Мошкин, В.И., Техническое зрение роботов [Текст] / В.И. Мошкин, А.А. Петров, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенко. Под ред. Ю.Г. Якушенко. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.

[10] Шлычков, В.И. Исследование точностных характеристик алгоритмов измерения координат в триангуляционных устройствах [Текст] / В.И. Шлычков // Оптический журнал. – 2005. – Т. 72. - № 6. – С. 73 – 76.

[11] Гришанов, А.В. Применение в автоматизированных системах лазерных измерений алгоритмов обработки двух пучков на одном кадре изображения [Текст] / А.В. Гришанов, В.Н. Гришанов, В.И. Мордасов. - Тез. докл. III Всероссийской научно-практической конференции "Решетневские чтения". - Красноярск: САА, 1999. - С. 23 - 24.

[12] Иванов, В.С. Основы оптической радиометрии [Текст] / В.С. Иванов и др.; под ред. проф. А.Ф. Котюка. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 544 с.

[13] Волков, В.Г. Сверхвысокочувствительные телевизионные системы [Текст] / В.Г. Волков // Специальная техника. – 2002. - № 4. – С. 2 – 11.

[14] Захаров, А.И. Геодезические приборы: Справочник [Текст] / А.И. Захаров - М.: Недра, 1989. - 314 с.



[15] Юркевич, В.В. Адаптированный контроль геометрических параметров [Текст] / В.В. Юркевич, А.А. Митропольский // Контроль. Диагностика, 2015. - № 5. – С. 51 – 53.

## **APPLICATIONS OF STRUCTURED IN SPACE AND TIME LASER BEAM IN VIBROMETER**

**Ekaterina V.  
Burnaevskaja,  
Vladimir N. Grishanov**

Samara State Aerospace University  
(SSAU)  
Moskovskoe shosse, 34, Samara,  
443086, Russian Federation  
vladgrishanov@yandex.ru

*Developed laser meters vibratory, allowing simultaneous capture of three spatial components displacement surface - two corner and one progressive. To measure the angular displacement components used mirror component reflected by the surface of the radiation, and translational - diffuse. Repetitively pulsed mode laser provides a measurement of the frequency of vibration. It is shown that a primation in vibrometers structured in space and time of the laser beams, the performance of vibration meters and extends the range of the measured parameters.*

**Key words:** *vibrometry; pulse; laser; displacement; transverse structure of the laser beam; the temporal structure of the laser beam*

### **References**

- [1] Iorish, Y.I. (1963), "Vibrometry. Measurement of vibration and shock. General theory, methods and instruments" [Vibrometrija. Izmerenie vibracii i udarov. ObShhaja teorija, metody i pribory], Mashinostroenie, Moscow.
- [2] Dobrynin, S.A. (1987), "Methods of automated study of machine vibration" [Metody avtomatizirovannogo issledovaniya vibracii mashin: Spravotchnik], Mashinostroenie, Moscow.
- [3] Kozotchkin, M.P. (2009), "Attractors in cutting and prospects of their use in the diagnosis" [Attraktory pri rezanii i perspektivy ih ispolzovanija v diagnostike], Izmeritel'naja tehnika, № 2, pp. 37 – 41.
- [4] Shahmatov, E.V. (2014) "A comprehensive solution to the problems of dynamics and vibroacoustics" [Kompleksnoe reshenie problem dinamiki i vibroakustiki], Dinamika i vibroakustika, № 2, S. 1, p. 10.
- [5] Sabirov, F.S. (2012) "Diagnostic tools using three-component vibration sensors" [Diagnostika stankov s ispolzovaniem trehkomponentnyh datchikov vibracii], Kontrol. Diagnostika, № 12, pp. 66 – 72.
- [6] Grishanov, A.V. (2008) "Laser measuring the amplitude of the angular and linear vibratory" [Lasernyj izmeritel amplitudy uglovyh i linejnyh vibroperemeShhenij], Patent RF № 2324906 C2, M.kl. G01H 9/00. Byl. 20.05.2008, № 14.
- [7] Grishanov, V.N. (2012) "Laser measuring amplitude and frequency linear and angular vibratory" [Lasernyj izmeritel amplitud i tchastot linejnyh i uglovyh vibroperemeShhenij], Patent na poleznyj model RF № 121567 U1, M.kl. G01H 9/00. Byl. 27.10.2012, № 30.
- [8] Demkin, V.N. (2008) "Laser technology in the measurement of the surface geometry of complex shape" [Lazernye tehnologii pri izmerenii geometrii poverhnosti sloznoj formy], Vestnik SPbO AIN. Vyp. 5. – Saint-Petersburg, pp. 138 – 187.
- [9] Moshkin, V.I. (1990), "The technical vision of robots" [Tehnicheskoe zrenie robotov], Mashinostroenie Moscow.
- [10] Shlytchikov, V.I. (2005) "Study accuracy characteristics of algorithms in coordinate measuring triangulation devices" [Issledovanie totchnostnyh harakteristik algoritmov izmerenija koordinat v triangulacionnyh ustrojstvah], Optic journal, T. 72. - № 6. – S, pp. 73 – 76.
- [11] Grishanov, A.B., Grishanov B.H., Mordasov V.I (1999) "The use of automated systems, laser measurement algorithms of the two beams in one frame image" [Primenenie v avtomatizirovnyh sistemah lazernyh izmerenij algoritmov obrabotki dvuh putchkov na odnom kadre izobragenija] III Vserossijskoj nautchno-praktičeskoj konferencii "Reshetnevskije tchtenija", Krasnojarsk: SAA, pp. 23 - 24.
- [12] Ivanov, V.S. (2003) "Fundamentals of optical radiometry" [Osnovy optičeskoj radiometrii], Moscow, FIZMATLIT.
- [13] Volkov, V.G. (2002) "Ultra High-TV systems" [Sverhvyssokotchuvstvitelnye televizionnye sistemy], Special Technics № 4.
- [14] Zaharov, A.I. (1989) "Geodetic instruments: Directory" [Geodezičeskije pribory: Spravotchnik], Moscow.
- [15] Yurkevich, V.V., Mitropolski A.A. (2015), "Adaptive control of geometrical parameters" [Adaptivnjj control geometritcheskih parametrov], pp. 51 – 53.