

Оптическая система контроля расположения элементов высокоточного измерительного стенда

В. В. Холкин¹, В. Ю. Холкин²✉

¹ООО "Стройсервис"

ул. Расплетина, д. 5, стр. 1, Москва, 123060, Россия

²ОАО "Авангард"

Кондратьевский пр., д. 72, Санкт-Петербург, 195271, Россия

✉ vkholkin@mail.ru

Аннотация

Введение. При эксплуатации высокоточных измерительных стендов необходимо обеспечить достоверность измерений. Изменение расположения элементов измерительного тракта, особенно в стендах, работающих в СВЧ-диапазоне, приводит к искажению полученных результатов измерений. Для достижения достоверности измерений необходимо контролировать расположение элементов измерительного стенда, при этом контроль должен проводиться в процессе измерения, устройство контроля должно подключаться к автоматической системе управления измерительным стендом, не воздействовать механически на элементы стенда и не привносить электрических и электромагнитных помех.

Цель работы. Разработка системы контроля перемещений элементов высокоточного измерительного стенда с точностью $1.0 \cdot 10^{-4}$ мм, не оказывающей механического воздействия на контролируемые элементы и не вносящей электрических и электромагнитных помех с возможностью цифровой обработки сигнала.

Материалы и методы. В разработанной системе использованы оптические методы контроля перемещений, основанные на геометрической оптике. Для регистрации реакции системы на изменение положения оптического пути используются приборы с зарядовой связью.

Результаты. Разработаны 2 варианта системы контроля. В первом варианте система позволяет регистрировать изменения в расположении элементов стенда, во втором – идентифицировать элемент, изменивший геометрическое положение. Система способна регистрировать перемещения элементов стенда на $1.0 \cdot 10^{-4}$ мм и контролировать расположения элементов стенда при вибрационном воздействии, не оказывает механического и электромагнитного воздействия на элементы стенда. Все элементы системы не чувствительны к воздействию СВЧ-излучения и повышенного радиационного фона, за исключением прибора с зарядовой связью, который должен располагаться вне зоны облучения. Математическое моделирование позволило оценить чувствительность оптической системы контроля. Предложен способ повышения точности системы с помощью увеличения оптического пути и использования корректирующего отражателя.

Заключение. Разработанная система контроля перемещений элементов высокоточного измерительного стенда обеспечивает требования, обозначенные в цели работы. Позволяет производить цифровую обработку сигнала. Может использоваться в стендах с повышенным СВЧ-, рентгеновским и радиационным излучением. В сравнении с системами, основанными на других физических принципах, разработанная система значительно проще в реализации. Новизна используемой системы контроля подтверждена патентом.

Ключевые слова: контроль перемещений, контроль структурной целостности, оптическая система контроля, измерительный стенд

Для цитирования: Холкин В. В., Холкин В. Ю. Оптическая система контроля расположения элементов высокоточного измерительного стенда // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 4. С. 89–98. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-4-89-98

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.07.2019; статья принята к публикации после рецензирования 16.08.2019;

© Холкин В. В., Холкин В. Ю., 2019



опубликована онлайн 27.09.2019

Optical Control System for Displacement Monitoring of the High Precision Measurement Setup Elements

Victor V. Kholkin¹, Vladimir Yu. Kholkin²✉

¹ LLC "Stroyservice"

5, Raspletina str., block 1, 123060, Moscow, Russia

² OAO "Avangard"

72, Kondratievsky ave., 195271, St Petersburg, Russia

✉ vkholkin@mail.ru

Abstract

Introduction. It is necessary to ensure the reliability of measurements when operating high-precision measurement setups. The elements displacement of the measurement path introduces measurement results distortions, especially in measurement setups operating in the microwave range. It is necessary to monitor the elements positions of the measurement setup to ensure the measurements reliability. The monitoring should be performed during the measurement, and the control device should be connected to the automatic control system of the measurement setup, and it should neither mechanically affect the setup elements nor introduce the electrical and electromagnetic interferences.

Objective. The objective of the present work is a design of the control system, which allows monitoring of elements displacements of the high precision measuring setup with an accuracy of $1.0 \cdot 10^{-4}$ mm. And the designed control system should neither mechanically affect the controlled elements nor introduce the electrical and electromagnetic interferences, thus allowing the digital signal processing.

Materials and methods. The designed system utilizes optical methods of the displacements monitoring, which are based on the geometric optics principles. The charge-coupled devices (CCD) to record the system response to optical path changes are used.

Results. Two designs of the control system for the displacement monitoring of the high precision measurement setup elements are presented. The first system design allows detecting the elements displacement occurrence, and the second system design allows to identify the displaced element. The system is capable to register the elements displacements with accuracy of $1.0 \cdot 10^{-4}$ mm and monitor the elements positions while vibration exposures. The system does not mechanically or electromagnetically affect the controlled elements. All system elements are resistant to the microwave radiation and increased background radiation, excluding CCD that should be placed outside the active zone. The mathematical simulation allows assessing the sensitivity of the designed optical control system. The system sensitivity increasing method by the optical path increasing and corrective reflector using is proposed.

Conclusion. The designed control system for the displacements monitoring of the high precision measurement setup elements meets the requirements imposed on it. The system allows the digital signal processing and can withstand the increased microwave, X-ray and background radiation. The designed system is much simpler to implement in comparison with systems based on other physical principles. The novelty of the control system technical solution is confirmed by the patent.

Key words: displacement control, structural integrity control, optical control system, measurement setup

For citation: Kholkin V. V., Kholkin V. Yu. Optical Control System for Displacement Monitoring of the High Precision Measurement Setup Elements. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 4, pp. 89–98. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-4-89-98

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Submitted 10.07.2019; accepted 16.08.2019; published online 27.09.2019

Введение. Развитие высокоточных средств измерений с все возрастающими требованиями к достоверности измерений заставляет искать но-

вые способы контроля состояния измерительной аппаратуры, в том числе способы контроля расположения составных частей измерительной тех-

ORIGINAL ARTICLE
Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн
Measuring Systems and Instruments Based on Acoustic, Optical and Radio Waves

ники. Особенно данные требования распространяются на стенды, работающие в СВЧ-диапазоне. При этом средства контроля не должны воздействовать на контролируемые части как механически, так и привнесением электрических и электромагнитных помех [1].

Кроме стендов, работающих с СВЧ-устройствами, прецизионный контроль положения элементов установок требуется в области, связанной с голографией, особенно при исследовании свойств вновь сформированных структур. Так, при разработке стенда по изучению интерференционных свойств слоистых структур на основе бактериородопина исследователями была подчеркнута особая важность устранения проблем, связанных с юстировкой оптических элементов, возникающих ввиду особой чувствительности подобных устройств к сторонним механическим воздействиям [2].

В настоящее время основными методами контроля перемещений объектов, применяемыми в экспериментальных стендах, являются:

- индуктивные методы, основанные на преобразовании перемещения объекта контроля в изменение индуктивности электрической цепи;
- емкостные методы, основанные на преобразовании перемещения объекта контроля в изменение емкости электрической цепи;
- реостатные методы, основанные на перемещении движка прецизионного реостата при изменении перемещения объекта контроля [3].

Также для контроля перемещений применяются ультразвуковые датчики положения и акселерометры, установленные на объекты контроля. Ультразвуковые датчики основаны на измерении времени до прихода ультразвукового импульса, отраженного от объекта [4].

Для измерения перемещений объектов также используется пневматический преобразователь. Работа устройства основана на изменении расхода сжатого воздуха при линейном перемещении объекта контроля. Расход воздуха меняется за счет изменения площади проходного сечения канала истечения. Таким образом, измеряя расход воздуха при условии постоянного давления можно получить информацию о перемещении объекта контроля. Пневматические системы контроля перемещений обладают высокой точностью и относительно малыми габаритами, однако их применение

накладывает необходимость использования воздушной сети с фиксированным давлением, что в некоторых случаях может быть затруднительно. Кроме того, инерционность пневматических систем отрицательно сказывается на производительности последних и, более того, делает невозможным контроль вибрационных воздействий [5].

Проблему контроля перемещений пытаются решить, в том числе используя оптические средства контроля [6–8]. Наиболее известные оптические методы контроля линейных перемещений основаны на явлениях дифракции и интерференции [9].

Работа лазерных интерферометров заключается в сложении двух когерентных лучей от источника излучения, которым является лазер. При этом траектория первого луча остается неизменной, а путь второго зависит от расстояния до объекта контроля. Таким образом, изменение расстояния приводит к перераспределению интенсивностей и к усилению либо ослаблению суммарного потока (в зависимости от разности фаз). К недостаткам интерферометров следует отнести их чувствительность к вибрации, требования к неискаженной опорной когерентной волне и сложность в обработке интерферограмм [10, 11].

Дифракционные датчики перемещения основаны на сдвиге интерференционных полос при перемещении контролируемого объекта. К недостаткам устройств подобного типа относят недостаточную точность, большие габариты и высокие требования к когерентности источника излучения [12].

Еще одним способом измерения расстояния являются лазерные дальнометры, основанные на измерении сдвига фаз между излученным и отраженным сигналами (непрерывный режим работы) либо времени между излученным и отраженным импульсами (импульсный режим работы) [13]. Серьезным недостатком подобных устройств является сложность их применения на малых расстояниях [14].

Общим недостатком, присущим перечисленным устройствам, является недостаточная чувствительность, что вынуждает усложнять системы и использовать дорогостоящие высокоточные комплектующие.

Описание работы оптической системы контроля перемещения частей измерительного стенда. Решением, позволяющим исключить недостатки, связанные с недостаточной чувствительностью измерительной системы и с необхо-

димостью использования дорогостоящих комплекующих, является создание оптической системы контроля, основанной на использовании оптического умножителя и отражения луча лазера от криволинейной поверхности [15] (рис. 1).

Система состоит из следующих частей: базовой площадки 1 с установленным на ней лазером 6, излучающим луч 7; контролируемых элементов стэнда 2–4 с закрепленными на них зеркалами 8–10; корректирующего отражателя 11; умножителя 5 с системой зеркал 12, 13 и прибора с зарядовой связью (ПЗС-матрица) 14.

Предлагаемая оптическая система контроля перемещения частей измерительного стэнда 2–4 относительно друг друга работает следующим образом: установленный на базовой площадке стэнда лазер 6 генерирует луч света 7, который последовательно отражаясь от зеркал 8–10, установленных на контролируемых частях стэнда, попадает на корректирующий отражатель 11. Да-

лее луч света 7, многократно отражаясь от зеркал 12 и 13, попадает на ПЗС-матрицу 14.

Для избежания взаимной компенсации, когда перемещение одного элемента компенсируется перемещением другого, а также когда перемещение происходит вдоль поверхности зеркала, в качестве зеркал 8–10 следует использовать криволинейные зеркальные поверхности.

Представленная на рис. 1 система контроля перемещения частей измерительного стэнда проста в реализации.

Для точного позиционирования лазерного луча разработан зеркалодержатель (рис. 2), снабженный шарнирными фиксаторами 4–6, позволяющими выставить зеркало 2 в необходимом положении. Угол отражения выставляется с помощью микрометрического винта, расположенного в верхней части зеркалодержателя. Лазерный луч распространяется по направляющим 1, 3. Зеркалодержатель крепится на контролируемом элементе с помощью площадки 7.

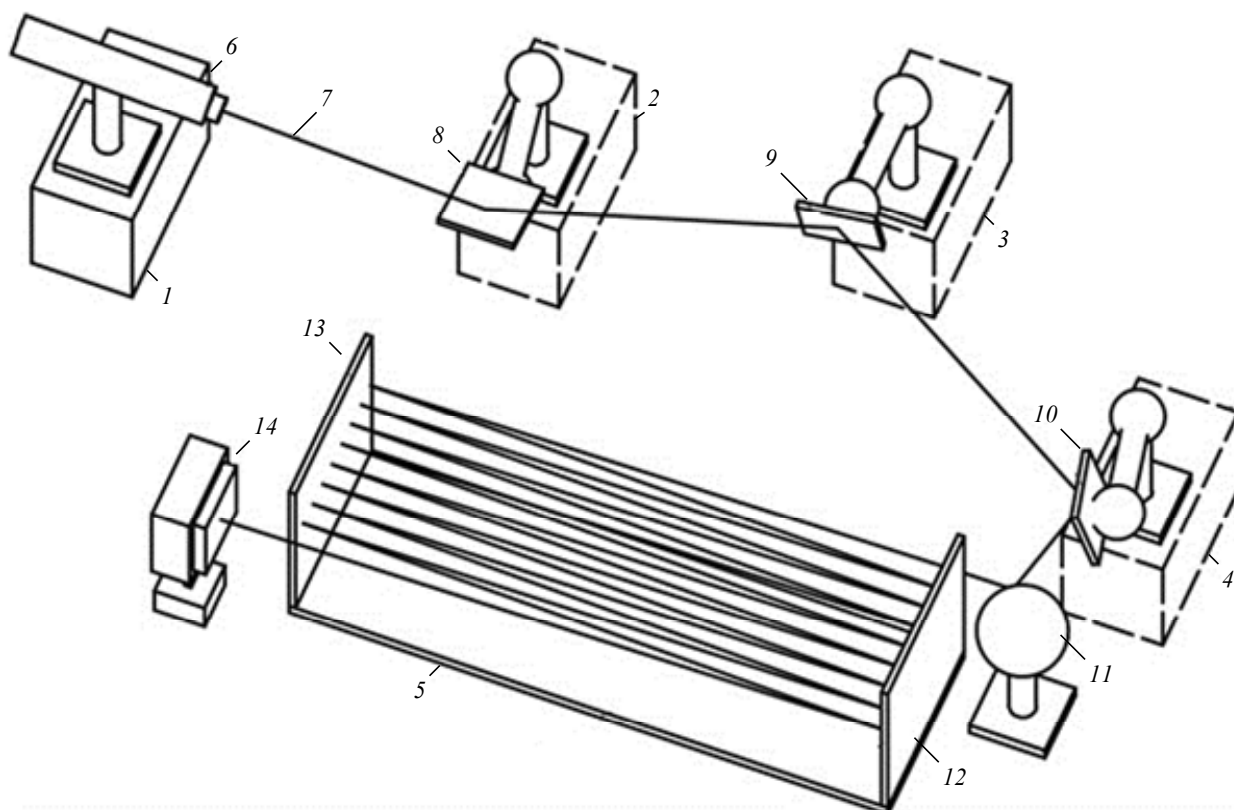


Рис. 1. Оптическая система контроля перемещения частей измерительного стэнда относительно друг друга

Fig. 1. Optical control system for monitoring of the measurement setup elements displacement relative to each other:
1 – base site; 2–4 – controlled elements; 5 – multiplier; 6 – laser; 7 – laser beam; 8–10 – mirrors mounted on the controlled elements; 11 – corrective reflector; 12, 13 – multiplier mirror system; 14 – CCD

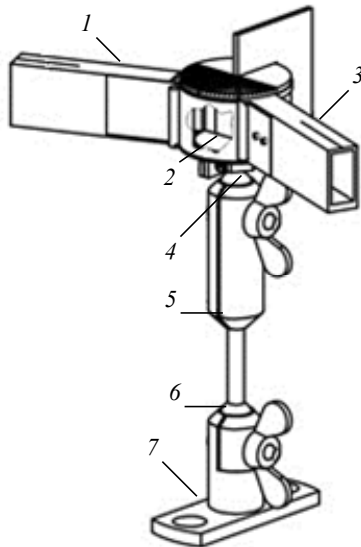


Рис. 2. Зеркалодержатель

Fig. 2. Mirror holder: 1, 3 – beam guides; 2 – mirror;
4–6 – hinged clamps; 7 – mounting pad

Разработанный корректирующий отражатель (рис. 3) состоит из криволинейного зеркала сферической или цилиндрической формы 1, расположенного в оправе. В конструкцию корректирующего отражателя входят шарнирные фиксаторы 2–4 для регулировки положения в пространстве и микрометрический винт для точной настройки. Корректирующий отражатель крепится с помощью площадки 5*.

Оптическая система обнаружения перемещений частей измерительного стенда относительно базовой точки. Одним из недостатков описанной оптической системы контроля перемещения частей измерительного стенда является то, что с ее помощью возможно зарегистрировать нарушение целостности геометрических размеров размещения контролируемых элементов как единой конструкции. При этом информация, какой именно элемент конструкции смещен, отсутствует, что усложняет поиск неисправности. Для фиксации смещений отдельных элементов измерительного стенда предлагается система обнаружения их перемещений относительно базовой точки.

Принцип работы оптической схемы системы обнаружения перемещений контролируемых элементов измерительного стенда относительно базовой точки (рис. 4) заключается в следующем: лазеры $6a$, $6b$, $6в$ испускают лучи $7a$, $7б$, $7в$ раз-

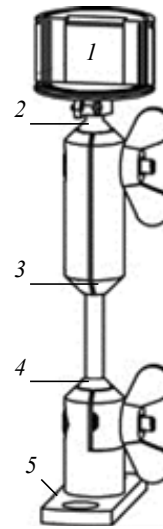


Рис. 3. Корректирующий отражатель

Fig. 3. Corrective reflector:
1 – curved mirror; 2–4 – hinged clamps; 5 – mounting pad

ной длины волны. Каждый из этих лучей падает на одно из зеркал 8–10, размещенных на различных контролируемых элементах стенда 2–4, после чего отражается от корректирующего отражателя 11, зеркал 12, 13 умножителя 5 и поступает на ПЗС-матрицу 14. Разная длина волны лучей позволяет зафиксировать смещение каждого контролируемого элемента относительно базовой точки размещения лазеров 15.

В случае недостаточной разрешающей способности ПЗС-матрицы при цветodelении следует использовать несколько ПЗС-матриц для каждого контролируемого элемента.

Чувствительность оптической системы контроля расположения элементов высокоточного измерительного стенда. Чувствительность предложенной оптической системы контроля определяется системой зеркал оптического умножителя в соответствии со схемой прохождения луча в умножителе (рис. 5).

Задача системы зеркал оптического умножителя 12, 13 заключается в том, чтобы в ограниченном пространстве увеличить смещение пятна лазерного луча 7 на ПЗС-матрицу 14 при изменении угла наклона β , увеличив тем самым чувствительность схемы.

В соответствии с рис. 5 чувствительность μ оптического умножителя определяется зависимостью изменения расстояния x от изменения угла β .

* На оптических схемах рис. 1, 4 зеркалодержатели и корректирующий отражатель показаны условно.

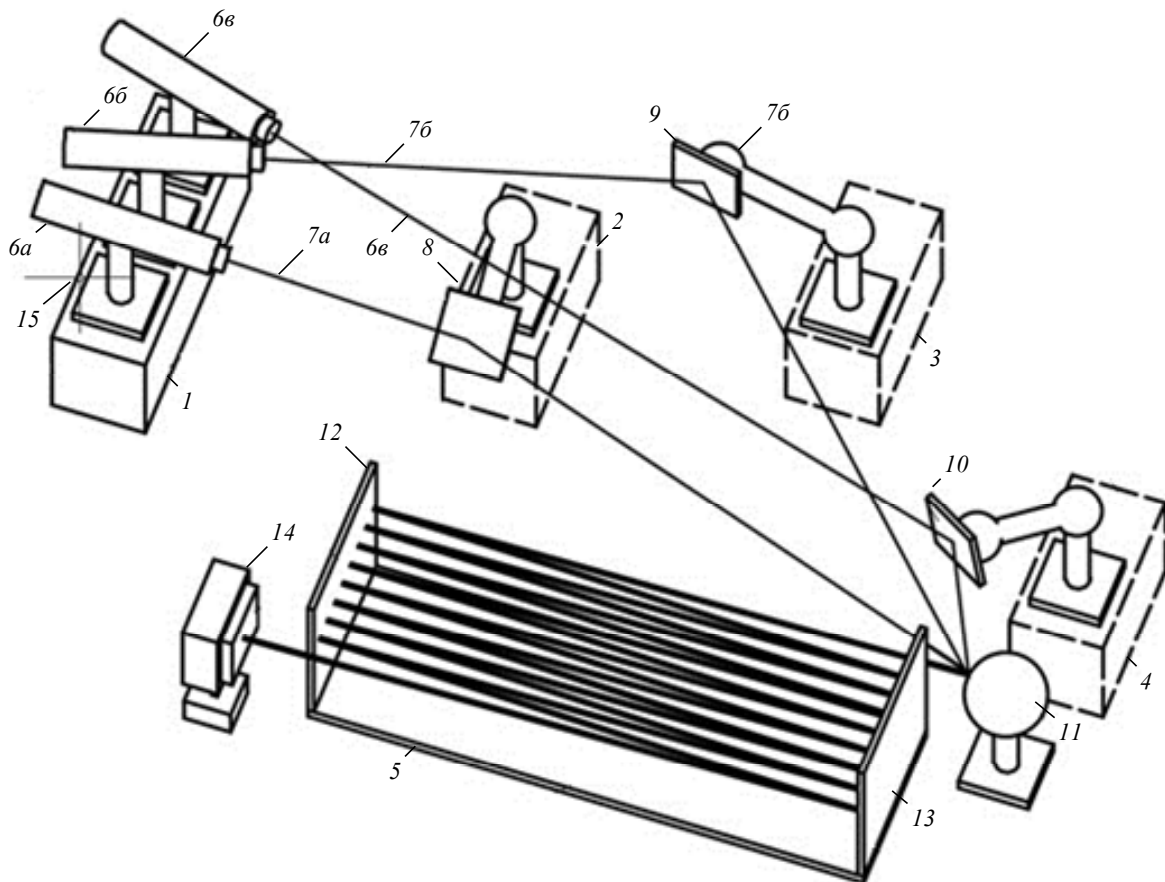


Рис. 4. Оптическая система контроля перемещений частей измерительного стенда относительно базовой точки
 Fig. 4. Optical control system for monitoring of the measurement setup elements displacement relative to the base point:
 1 – base site; 2–4 – controlled elements; 5 – multiplier; 6a–6в – lasers; 7a–7в – laser beams with different wavelengths;
 8–10 – mirrors mounted on the controlled elements; 11 – correction reflector; 12, 13 – mirror system;
 14 – CCD; 15 – base point

Из рис. 5 следует, что величина отклонения определяется как $b = atg \beta$, где a – расстояние между зеркалами; β – угол отклонения от оси OA . Тогда для суммарного отклонения x оптического луча после n отражений получим:

$$x = [(n+1)a + h]tg \beta, \quad (1)$$

где h – расстояние от ПЗС-матрицы 14 до зеркала 12.

Для чувствительности оптического умножителя $\mu = dx/d\beta$ с использованием (1) имеем

$$\mu = \frac{(n+1)a + h}{\cos^2 \beta}. \quad (2)$$

Величина Δx перемещения светового пятна на ПЗС-матрице 14 определяется как

$$\Delta x = [(n+1)a + h]tg(\beta + \Delta\beta) - [(n+1)a + h]tg \beta, \quad (3)$$

где $\Delta\beta$ (рис. 5) – приращение угла отклонения β .

Из (3) с учетом (2) получим приближенное выражение для Δx :

$$\Delta x \approx \mu \Delta\beta. \quad (4)$$

Так, например, при $\Delta\beta = 2 \cdot 10^{-5}$ рад, $a = 500$ мм; $h = 0$ и $n = 100$ в соответствии с (4) получим $\Delta x = 1.01$ мм.

Изменения положения освещенного лучом пятна света на ПЗС-матрице на 1.01 мм достаточно для определения наличия или отсутствия перемещений элементов стенда относительно друг друга.

При угле перемещения $\Delta\beta = 2 \cdot 10^{-6}$ рад имеем $\Delta x = 0.101$ мм.

Даже при использовании ПЗС-матрицы с относительно невысокой плотностью размещения светочувствительных элементов (например, типа 1D фирмы «Kodak» [16]), разрешение которой составляет 2181 DPI (около 85.6 элементов на миллиметр),

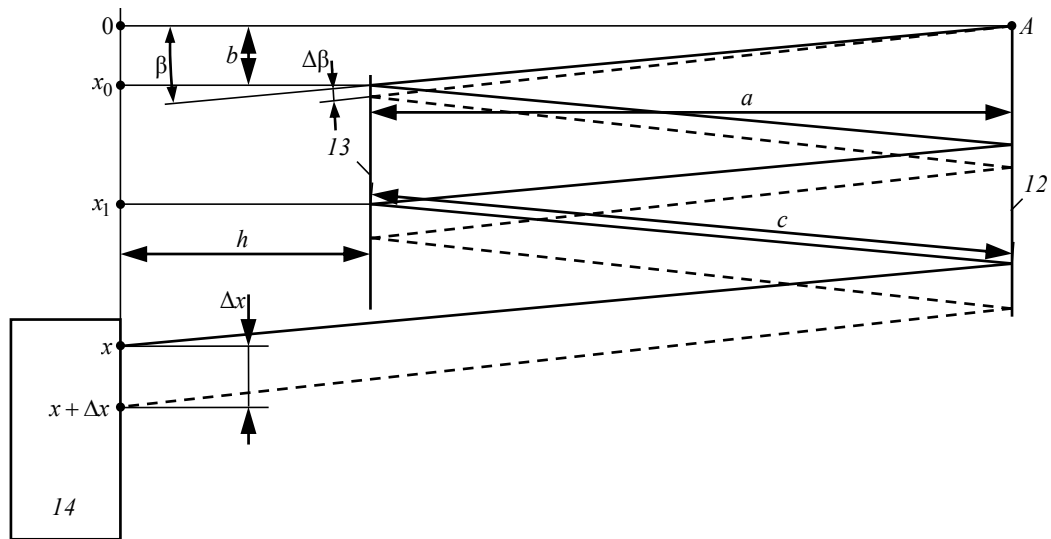


Рис. 5. Траектория луча в умножителе

Fig. 5. Multiplier beam path: 12, 13 –mirror system; 14 – CCD

количество засвеченных пикселей при фиксации перемещения пятна $\Delta x = 0.101$ мм составит $(2181/25.4)0.101 = 8$. Этого вполне достаточно, чтобы зафиксировать перемещение пятна света.

Если использовать матрицу с высокой плотностью расположения пикселей (iPhone 4s фирмы «OmniVision» с разрешением 18100 DPI или 712.598 пикселей на 1 мм [16]), то при угле перемещения $\Delta\beta = 2 \cdot 10^{-7}$ рад реагировать будут 7 пикселей.

Предложенный метод регистрации перемещений частей измерительного стенда позволяет при использовании ПЗС-матрицы с плотностью 18100 DPI, расстоянии между зеркалами 500 мм и стократном отражении в оптическом умножителе получить точность фиксации угла перемещения $\Delta\beta = 2 \cdot 10^{-7}$ рад.

Помимо регистрации возникновения перемещения частей стенда предложенный метод также позволяет использовать его как контрольно-измерительную систему определения перемещения частей стенда. Для этого необходимо определить зависимость изменения угла β (рис. 5) от перемещения x_{Π} (рис. 6) зеркала (например, 8), установленного на контролируемом элементе, и радиуса R корректирующего отражателя 11 (см. рис. 1).

Принцип использования предлагаемого устройства в качестве контрольно-измерительной системы заключается в установке зеркал под известным заранее углом (рис. 6) с последующим определением зависимости изменения расположения

светового пятна на ПЗС-матрице с расстоянием перемещения контролируемого элемента x_{Π} .

Необходимо отметить, что принцип работы предлагаемого способа регистрации перемещений позволяет в случае необходимости увеличивать чувствительность измерительного прибора как с помощью уменьшения радиуса корректирующего отражателя 11 (рис. 6), так и увеличением количества отражений n от зеркал 12, 13 (рис. 5).

В случае использования корректирующего отражателя 11 с радиусом 5 мм и падения луча

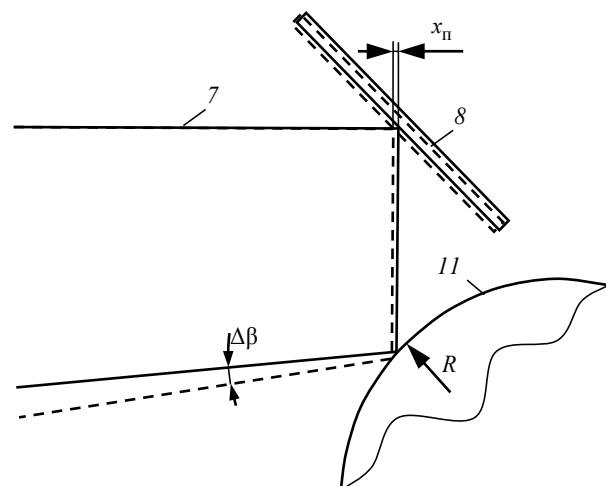


Рис. 6. Траектория луча при использовании зеркала на контролируемом элементе и корректирующего отражателя

Fig. 6. Beam path when using the corrective reflector and mirror mounted on the controlled element: 7 – laser beam; 8 – mirror mounted on the controlled element; 11 – corrective reflector

лазера b в точку, расположенную от центра окружности на расстоянии 4.95 мм, при перемещении зеркала $x_{\text{П}} = 0.0001$ мм угол отклонения луча $\Delta\beta = 0.00028369$ рад, что при $a = 500$ мм; $h = 0$ и $n = 100$ в соответствии с (3) достаточно для регистрации перемещения с использованием ПЗС-матрицы невысокой плотности, разрешение которой составляет 2181 DPI.

Для компенсации затухания сигнала при увеличении отражений от зеркал можно повысить выходную мощность лазера. Физический предел, связанный с возможностью прожигания лучом лазера зеркал, можно отодвигать, используя высокотемпературные материалы, а также систему охлаждения зеркал [16].

Заключение. Преимущество предложенной оптической системы контроля перемещений элементов измерительного стенда заключается в простоте реализации, что позволяет создавать высокоточные устройства контроля расположения элементов конструкции измерительных стендов без риска механического и электрофизического воздействия на работу последних.

Использование в оптической системе контроля перемещений элементов конструкции оптического умножителя и отражения луча лазера от криволинейной поверхности позволяет при проектировании оптимизировать систему контроля в зависимости от необходимой чувствительности, сложности юстировки системы, а также габаритных размеров. Если позволяют габаритные размеры, необходимая чувствительность системы может быть обеспечена оптическим умножителем с несложной системой юстировки. В остальных случаях (невозможно расположить

зеркала на необходимом расстоянии, количество необходимых отражений превосходит возможности оптической системы по затуханию) необходимую чувствительность можно получить с помощью криволинейного отражателя, увеличивая кривизну поверхности. Оригинальность и новизна предложенной системы подтверждена патентом [15].

В отличие от прототипов предлагаемая оптическая система может работать при вибрационном воздействии, определяя по перемещению пятна засветки на фотоматрице докритический уровень перемещения элементов от ударного и вибрационного воздействий. При этом, в отличие от известных систем контроля, в том числе с использованием интерферометров, разработанная система позволяет по перемещению пятна засветки определять направление вибрационного или ударного воздействия.

С учетом невысокой стоимости ПЗС-матриц, а также лазерных излучателей предлагаемая оптическая система контроля перемещений может быть использована не только в прецизионных устройствах, но и как основная или дополнительная система контроля перемещения в оборудовании, а также в крупногабаритных устройствах и сооружениях.

Оптические системы контроля перемещений могут использоваться в условиях воздействия СВЧ-, а также рентгеновского и радиационного излучений.

Предложенная система контроля перемещения частей измерительного стенда реализована в установке определения однородности с прецизионным узлом контроля механических воздействий на ЗАО НПО "Средмаш".

Список литературы

1. Безкоровайный В. С., Яковенко В. В., Ливцов Ю. В. Определение толщины упрочненного слоя металла магнитным методом // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 6. С. 102–110. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-6-102-110
2. Bioelectronic applications of photochromic pigments / ed. by A. Déry, L. Keszthelyi. Amsterdam: IOS Press, 2001. 725 p. (NATO Science Series, I: Life and Behavioural Sciences. Vol. 335).
3. Du W. Resistive, Capacitive, Inductive, and Magnetic Sensor Technologies. Boca Raton: CRC Press, 2015. 408 p.

4. Hauptmann P., Hoppe N., Püttmer A. Application of ultrasonic sensors in the process industry // Measurement Science and Technology. 2002. Vol. 13, № 8. R73. doi: 10.1088/0957-0233/13/8/201
5. Liptak B. G., Venczel K. Instrument and automation engineers' handbook. Vol. I: Measurement and Safety. 5th ed. Boca Raton: CRC press, 2018. 226 p.
6. Пат. RU 2 482 448 C2. G01B11/00, G01B11/27 (2006.01). Оптическая измерительная система для определения взаимного расположения элементов в пространстве, способ и устройство регистрации опти-

ческого излучения для использования в ней / К. Н. Ки-
форенко, Ф. В. Семенов; опублик. 20.05.2013. Бюл. № 14.

7. Bridge Displacement Monitoring Method Based
on Laser Projection-Sensing Technology / X. Zhao, H. Liu,
Y. Yu, X. Xu, W. Hu, M. Li, J. Ou // Sensors. 2015. Vol. 15,
№ 4. P. 8444–8463. doi: 10.3390/s150408444

8. Оптико-электронный преобразователь кон-
троля смещений элементов крупногабаритных кон-
струкций / В. А. Шубарев, А. Н. Михайлов, Ф. В. Молев,
И. А. Коняхин, А. Н. Тимофеев, А. С. Васильев // Во-
просы радиоэлектроники. 2014. Т. 1, № 2. С. 53–62.

9. Иванов А. Н., Киреевков В. Е., Носова М. Д. Ди-
фракционные методы контроля пространственного
положения объектов // Приборостроение. 2013.
№ 11. С. 78–82.

10. Арчакова Е. В., Козлов Н. П. Дифракционный
датчик волнового фронта // Изв. Самарского науч.
центра РАН. 2010. Т. 12, № 4. С. 134–137.

11. Interferometry – Research and Applications in
Science and Technology / ed. by I. Padron. Hamburg:
Books on Demand, 2012. doi: 10.5772/2635

12. Батомункуев Ю. Ц., Мещеряков Н. А. Датчики
перемещений с двумерной дифракционной решеткой
// Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. Т. 5, вып. 3. С. 32–37.

13. Ready J. F. Industrial applications of lasers. Lon-
don: Elsevier, 2012. 599 p.

14. Muralikrishnan B., Phillips S., Sawyer D. Laser
trackers for large-scale dimensional metrology: A review.
// Precision Engineering. 2016. Vol. 44. P. 13–28. doi: 10.1016
/j.precisioneng.2015.12.001

15. Пат. RU 2 609 746 C2. G06F 15/00, G06F 3/00,
G01B 11/00 (2006.01). Устройство контроля возникно-
вения перемещения частей конструкций сооружения
/ В. В. Холкин; опублик. 02.02.2017. Бюл. № 4.

16. Пат. RU 2 046 381 C1. G02B 5/08 (1995/01).
Охлаждаемое лазерное зеркало / В. С. Дементьева,
П. П. Кузнецов, Л. Н. Поняева, В. М. Носкова; опублик.
20.10.1995.

Информация об авторах

Холкин Виктор Владимирович – магистр технических наук (2013) по направлению "Приборострое-
ние", ведущий инженер (2016) ООО "Стройсервис". Автор 11 научных работ. Сфера научных интересов –
оптоэлектронные приборы; приборы на основе бактериородопсина.
E-mail: 42answer42@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8079-4223>

Холкин Владимир Юрьевич – доктор технических наук (2011), начальник отдела Открытого Акционер-
ного Общества "Авангард". Автор 112 научных работ. Сфера научных интересов – надежность радиоэлек-
тронной аппаратуры; низкочастотные шумы.
E-mail: vkholkin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8975-0654>

References

1. Bezkorovayniy V. S., Yakovenko V. V., Livtsov Y. V. De-
termination of Hardened Metal Layer Thickness Using
Magnetic Method. Journal of the Russian Universities. Radi-
oelectronics. 2018, no. 6, pp. 102–110. doi: 10.32603/1993-
8985-2018-21-6-102-110 (In Russ.)

2. Bioelectronic applications of photochromic pig-
ments. Ed. by A. Déry, L. Keszthelyi. Amsterdam, IOS
Press, 2001, 725 p. (NATO Science Series, I: Life and Be-
havioural Sciences. Vol. 335).

3. Du W. Resistive, Capacitive, Inductive, and Magnetic
Sensor Technologies. Boca Raton, CRC Press, 2015, 408 p.

4. Hauptmann P., Hoppe N., Püttmer A. Application
of ultrasonic sensors in the process industry. Measure-
ment Science and Technology. 2002, vol. 13, no. 8, R73.
doi: 10.1088/0957-0233/13/8/201

5. Liptak B. G., Venczel K. Instrument and automa-
tion engineers' handbook. Vol. I. Measurement and Safe-
ty. 5th ed. Boca Raton, CRC press, 2018, 226 p.

6. Kiforenko K. N., Semenov F. V. Pat. RF 2 482 448 C2.
G01B11/00, G01B11/27 (2006.01). Optical Measuring System

for Determining the Relative Position of Elements In Space, a
Method and Device for Recording Optical Radiation for Use in
It. Publ. 20.05.2013. (In Russ.)

7. Zhao X., Liu H., Yu Y., Xu X., Hu W., Li M., Ou J.
Bridge Displacement Monitoring Method Based on Laser
Projection-Sensing Technology. Sensors. 2015, vol. 15,
no. 4, pp. 8444–8463. doi: 10.3390/s150408444

8. Shubarev V. A., Mihajlov A. N., Molev F. V., Konja-
hin I. A., Timofeev A. N., Vasil'ev A. S. Optoelectronic
Converter for Monitoring the Displacement of Elements
of Large Structures. Issues of Radio Electronics. 2014,
vol. 1, no. 2, pp. 53–62. (In Russ.)

9. Ivanov A. N., Kireenkov V. E., Nosova M. D. Diffra-
ction Methods for Control of Object Position. Journal of
Instrument Engineering. 2013, no. 11, pp. 78–82. (In Russ.)

10. Archakova E. V., Kozlov N. P. Wavefront Diffra-
ction Sensor. Izv. of Samara Scientific Center of the Rus-
sian Academy of Sciences. 2010, vol. 12, no. 4, pp. 134–
137. (In Russ.)

11. Interferometry – Research and Applications in Science and Technology. Ed. by I. Padron. Hamburg, Books on Demand, 2012. doi: 10.5772/2635

12. Batomunkuev Ju. C., Meshherjakov N. A. Motion Sensors with a Two-Dimensional Diffraction Grating. Interexpo GEO-Siberia. 2013, vol. 5, iss. 3, pp. 32–37. (In Russ.)

13. Ready J. F. Industrial applications of lasers. London, Elsevier, 2012, 599 p.

14. Muralikrishnan B., Phillips S., Sawyer D. Laser trackers for large-scale dimensional metrology: A review.

Precision Engineering. 2016, vol. 44, pp. 13–28. doi: 10.1016/j.precisioneng.2015.12.001

15. Holkin V. V. Pat. RF 2 609 746 C2. G06F 15/00, G06F 3/00, G01B 11/00 (2006.01). Device for Controlling the Occurrence of Movement of Structural Parts of a Structure. Publ. 02.02.2017. (In Russ.)

16. Dement'eva V. S., Kuznecov P. P., Ponjaeva L. N., Noskova V. M. Pat. RF 2 046 381 C1. G02B 5/08 (1995/01). Cooled Laser Mirror. Publ. 20.10.1995. (In Russ.)

Information about the authors

Victor V. Kholkin – Master Sci. (2013) on Instrument Engineering, Senior Engineer (2016) in LLC "Stroyservice" (Saint Petersburg). The author of 11 scientific publications. Area of expertise: optoelectronic devices; bacteriorhodopsin based devices.

E-mail: 42answer42@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8079-4223>

Vladimir Yu. Kholkin – Dr. Sci. (Engineering) (2011), Head of the Department (2017) in JSC "Avangard". The author of 112 scientific publications. Area of expertise: electronic equipment reliability; low-frequency noise.

E-mail: vkholkin@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8975-0654>