

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT AND RADIO ENGINEERING

УДК 62-791.2

doi:10.21685/2072-3059-2022-1-8

Опτικο-электронные информационно-измерительные системы определения абсолютного положения объекта

Т. И. Мурашкина¹, Е. А. Бадеева², К. С. Самохина³, А. В. Бадеев⁴, А. А. Толова⁵

^{1,2,3,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹timurashkina@mail.ru, ²badeeva_elena@mail.ru,

³cbazykin@yandex.ru, ⁴badeyev@mail.ru, ⁵nbeshkova@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время при модернизации отечественной ракетно-космической и авиационной техники (РК и АТ) особое внимание уделяется точности изготовления крупногабаритных корпусных деталей, входящих в состав ответственных изделий. Точность изготовления крупногабаритных деталей определяется минимизацией допусков на размеры, а также применяемыми для этого средствами измерений. Объектом исследования являются опτικο-электронные информационно-измерительные системы (ОЭИИС) для определения линейных размеров крупногабаритных деталей объектов РК и АТ и определения абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве. Предметом исследования являются научно-технические решения определения конструктивных параметров и связей оптических и электрических схем, обеспечивающие создание ОЭИИС с определением абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве при измерении линейных размеров крупногабаритных изделий. Цель работы – повышение точности измерений и достоверности линейных размеров крупногабаритных корпусных деталей изделий РК и АТ путем совершенствования оптической системы ОЭИИС и разработки новых методов определения абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве. *Материалы и методы.* При проведении исследований использовались теория точности измерительных систем, математического анализа, интегрального и дифференциального исчисления, методы геометрической оптики, математическая обработка полученных результатов, моделирование и графические построения в программах Microsoft Office, Libre Office, MathCAD, положения теории измерений. *Результаты.* Разработан способ определения пространственных точек, обеспечивающий снижение накопленной погрешности измерения, отличающийся тем, что оптические пучки разделяются по поляризации и по частоте, причем один оптический пучок проходит по вертикальной, а другой – по горизонтальной поляризации, по аб-

© Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А., Самохина К. С., Бадеев А. В., Толова А. А., 2022. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

солютному значению разности фаз двух оптических измерительных сигналов определяется абсолютное положение объекта в пространстве. Определена структура ОЭИИС с акустооптическим преобразованием оптических сигналов, реализующая предложенный способ. *Выводы.* На основании предложенного способа определения пространственных точек разработана ОЭИИС с повышенной точностью результатов измерения для определения абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве при измерении линейных перемещений в процессе изготовления крупногабаритных корпусных деталей летательных аппаратов.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, оптико-электронное устройство, погрешность, крупногабаритная деталь, абсолютное положение, пространственная точка, акустооптический модулятор

Для цитирования: Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А., Самохина К. С., Бадеев А. В., Голова А. А. Оптико-электронные информационно-измерительные системы определения абсолютного положения объекта // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 1. С. 88–100. doi:10.21685/2072-3059-2022-1-8

Optoelectronic information-measuring systems for determining the absolute position of an object

T.I. Murashkina¹, E.A. Badeeva², K.S. Samokhina³, A.V. Badeev⁴, A.A. Tolova⁵

^{1,2,3,4,5}Penza State University, Penza, Russia

¹timurashkina@mail.ru, ²badeeva_elena@mail.ru,

³cbazykin@yandex.ru, ⁴badeyev@mail.ru, ⁵nbeskova@mail.ru

Abstract. *Background.* Currently, during the modernization of domestic rocket, space and aviation equipment (RS and AE), special attention is paid to the accuracy of manufacturing large-sized body parts that are part of responsible products. The accuracy of manufacturing large-sized parts is determined by minimizing dimensional tolerances, as well as the measuring instruments used for this. The object of the study is optical-electronic information-measuring systems (OEIMS) for determining the linear dimensions of large-sized parts of objects of RS and AE and determining the absolute position of the measured object in space. The subject of the research is scientific and technical solutions for determining the design parameters and connections of optical and electrical circuits, providing the creation of OEIMS with the determination of the absolute position of the measured object in space when measuring the linear dimensions of large-sized products. The purpose of the research is to increase the measurement accuracy and reliability of the linear dimensions of large-sized body parts of RS and AE products by improving the optical system of OEIMS and developing new methods for determining the absolute position of the measured object in space. *Materials and methods.* During the research, the theory of accuracy of measuring systems, mathematical analysis, integral and differential calculus, methods of geometric optics, mathematical processing of the results obtained, modeling and graphical constructions in the programs Microsoft Office, Libre Office, MathCAD, SolidWorks, the provisions of the theory of measurements were used. *Results.* A method for determining spatial points has been developed that reduces the accumulated measurement error, characterized in that the optical beams are separated by polarization and frequency, with one optical beam passing along vertical and the other along horizontal polarization, the absolute value of the phase difference of the two optical measuring signals determines the absolute position of the object in space. The structure of OEIMS with acousto-optic conversion of optical signals implementing the proposed method is determined. *Conclusions.* Based on the proposed method for determining spatial points, an OEIMS with increased accuracy of measurement

results has been developed to determine the absolute position of the measured object in space when measuring linear displacements during the manufacture of large-sized body parts of aircraft.

Keywords: information-measuring system, optoelectronic device, error, large-sized part, absolute position, spatial point, acousto-optic modulator

For citation: Murashkina T.I., Badeeva E.A., Samokhina K.S., Badeev A.V., Tolova A.A. Optoelectronic information-measuring systems for determining the absolute position of an object. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2022;(1):88–100. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2022-1-8

Введение

В настоящее время при модернизации отечественной ракетно-космической и авиационной техники (РК и АТ) особое внимание уделяется точности изготовления крупногабаритных корпусных деталей, входящих в состав ответственных изделий [1]. Точность изготовления крупногабаритных деталей определяется минимизацией допусков на размеры, а также применяемыми для этого средствами измерений.

Для измерения линейных размеров деталей используются оптико-электронные информационно-измерительные системы (ОЭИИС), реализующие интерференционный принцип преобразования измерительных сигналов [2–4].

Работа гетеродинных интерференционных оптико-электронных устройств основана на преобразовании значения фазы оптической волны, проходящей измеряемое расстояние, в значение фазы выходного электрического сигнала с последующим измерением значения фазы этого сигнала фазометрическим устройством [5]. Изменению фазы выходного измерительного электрического сигнала на 360° соответствует изменение положения отражателя интерферометра или контролируемой поверхности на значение, равное или меньшее пространственного периода оптической волны.

С одной стороны, это является преимуществом интерференционных устройств, так как позволяет получить высокую разрешающую способность ОЭИИС порядка сотых долей микрона, но, с другой стороны, накладывает определенные трудности на процесс измерения линейных размеров, так как для измерения расстояния или линейного размера большего, чем длина оптической волны, необходимо переместить отражатель интерферометра или контролируемую поверхность, одновременно последовательно накапливая информацию об измеряемой величине. При этом случайный обрыв оптической связи приводит к потере измерительной информации, и в этом случае необходимо повторение процесса измерения, что снижает быстродействие ОЭИИС.

Применение данных устройств для определения абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве при проведении процесса измерения линейных размеров изделий накладывает определенные трудности из-за малого размера оптической длины волны.

Для уменьшения погрешности измерения физических параметров и повышения точности измерительной информации необходимо получать информацию об определении абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве, применение которого способствует развитию теоретических положений проектирования перспективных ОЭИИС.

В нашей стране основы теории и принципы построения ОЭИИС разрабатываются в Московском государственном технологическом университете СТАНКИН и Новосибирском институте автоматики и электрометрии. За рубежом разработкой и выпуском информационно-измерительных систем (ИИС) подобного типа занимаются фирмы Hewlett-Packard (США), Renishaw (Великобритания), Carl Zeiss (Германия) и другие компании. Большой вклад в разработку теории и принципов построения ОЭИИС внесли ученые В. П. Коронкевич, Г. А. Ленкова, Л. Ф. Порфирьев, В. Е. Привалов, Т. И. Мурашкина, В. И. Телешевский, А. И. Фомин, Ю. Г. Якушенков и др. [6–8]. Но до настоящего времени отсутствуют системные методологические исследования, посвященные разработке ОЭИИС абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве для изделий РК и АТ.

Цель работы: повышение точности измерений линейных размеров крупногабаритных корпусных деталей изделий РК и АТ путем совершенствования оптической системы ОЭИИС и разработки новых методов определения абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве.

Методология и методы исследования

При проведении исследований использовались теория точности измерительных систем, линейной алгебры и аналитической геометрии, математического анализа, интегрального и дифференциального исчисления, математической физики, методы геометрической оптики, решения оптимизационных задач, численного анализа, математическая обработка полученных результатов, моделирование и графические построения в программах Microsoft Office, Libre Office, MathCAD, SolidWorks, положения теории измерений при планировании и проведении экспериментов.

Работа ОЭИИС, использующих фазовый метод обработки информации, основана на различных физических эффектах. Определено, что наиболее точным и перспективным является акусто-оптический принцип преобразования измерительной информации в ОЭИИС [9] (рис. 1).

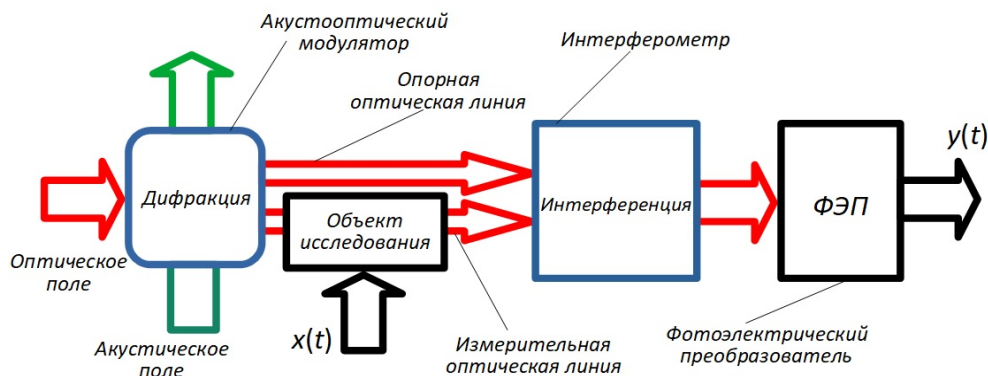


Рис. 1. Структурная схема ОЭИИС, осуществляющей акусто-оптическое преобразование измерительной информации

Оптическое поле от источника оптического излучения взаимодействует с акустическим полем в акустооптическом модуляторе (АОМ).

В результате этого оптические пучки разделяют на дифракционные оптические порядки, которые направляют по опорной и измерительной оптическим линиям [10]. На измерительную оптическую линию воздействует входной сигнал $x(t)$, изменяя характеристики оптического измерительного пучка. Оптические пучки опорной и измерительной оптических линий соединяют в интерферометре и направляют на фотоэлектрический преобразователь (ФЭП), формирующий электрический сигнал $y(t)$, который несет в себе измерительную информацию.

Бесконтактные оптические методы измерения линейных размеров в течение многих лет использовали явления интерференции и дифракции, однако обычные источники света не позволяли полностью раскрыть возможности этих методов. Высокая когерентность и монохроматичность лазерного излучения позволяют проводить измерения с большой точностью и на расстояниях, значительно превышающих те, которые доступны ИИС с обычными (некогерентными) источниками света. При использовании некогерентных источников света самое большое расстояние, которое может быть измерено интерферометрическим способом, около 500 мм. При использовании лазера в качестве источника оптического излучения диапазон измерения расширяется до 100 м. Этого достаточно для того, чтобы применить интерференционный прибор при монтаже ракеты или самолета, отсчете точных перемещений узлов крупногабаритного прецизионного оборудования и т.д.

Известные ОЭИИС проводят измерение перемещений объекта относительно какой-то точки в пространстве. При решении ряда задач возникает необходимость определения абсолютного положения объекта в пространстве при измерении линейных размеров, вычисленных с высокой точностью.

Возможность определения абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве при измерении линейных размеров в лазерных фазовых измерительных системах существенно повышает точность измерений линейных размеров крупногабаритных деталей в составе перспективных изделий РК и АТ путем совершенствования оптической системы ОЭИИС.

Изменение фазы измерительных электрических сигналов в фотоэлектрических преобразователях ФЭП1 и ФЭП2 относительно значения опорной фазы определяется уравнением

$$\varphi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt, \quad (1)$$

где $(t_2 - t_1)$ – интервал времени движения подвижного оптического отражателя (ПОО); $v(t)$ – значение изменения частоты измерительной оптической волны при движении ПОО за счет эффекта Доплера; λ – длина волны оптического излучения [10].

Диапазоном измерения в фазовых ОЭИИС для определения абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве при измерении линейных размеров изделий является значение расстояния по направлению распространения оптического излучения, при котором фаза выходного электрического сигнала изменяется на период. Это расстояние, на котором возможно такое периодическое измерение, зависит от степени временной когерентности применяемого источника оптического излучения.

Для определения абсолютного положения измеряемого объекта в пространстве при измерении линейных размеров изделий необходимо иметь размер пространственного периода измерительного сигнала, равный требуемому диапазону измерений. Перемещение подвижного объекта измеряется количеством счетных импульсов, формируемых отсчетным устройством во время движения измеряемого объекта. Измерительная информация при возникновении внешних помех во время проведения измерительной процедуры искажается, возникает погрешность измерения из-за неправильного подсчета измерительных импульсов. Тогда процесс измерения необходимо повторять заново.

Полностью устранить данный недостаток ОЭИИС, которые используют фазовый метод формирования измерительной информации, невозможно.

Результаты

Уменьшения погрешности измерения, обусловленной влиянием внешних помех, можно добиться формированием по трассе измерения промежуточных пространственных точек. Для их формирования в оптико-электронных устройствах используют разность фаз двух ортогонально поляризованных оптических сигналов, формируемых когерентным источником оптического излучения, например, ЛГН-303 [11].

Разработан способ определения пространственных точек, отличающийся тем, что оптические пучки разделяются по поляризации и, соответственно, по частоте, причем один оптический пучок проходит по вертикальной, а другой – по горизонтальной поляризации. При этом разность фаз между измерительными сигналами нарастает при проведении измерений, по абсолютному значению разности фаз оптических измерительных сигналов определяется абсолютное положение объекта в пространстве. При этом уменьшается накопленная погрешность измерения. Алгоритм вычисления расстояния между ближайшими пространственными точками, реализующий данный способ, приведен на рис. 2:

1) определяются действительные значения длин волн оптических пучков λ_1 и λ_2 делением их паспортных значений на показатель преломления воздуха n ;

2) в зависимости от значений λ_1 и λ_2 организуются два взаимоисключающих цикла с постуловием, где при проведении процесса измерения и движении подвижного измерительного объекта отсчетные устройства (ОУ) подсчитывают количество целых длин волн оптических пучков N , которые уложились в измеряемое расстояние;

3) когда первое ОУ относительно второго ОУ насчитает на один целый период длины волны оптического излучения больше, это означает, что подвижный объект находится в расположении следующей пространственной точки.

Разработана ОЭИИС на основе двухчастотного лазера, реализующая новый способ измерения, в ОЭИИС добавили поляризационный куб, разделяющий оптические пучки по поляризации (рис. 3).

Источник оптического излучения (ИОИ) формирует две длины волны λ_1 и λ_2 , вложенные друг в друга. Один оптический пучок имеет вертикальную поляризацию, а другой горизонтальную поляризацию. Оптическое излучение от источника оптического излучения подается на акустооптический модулятор (АОМ), где происходит дифракция света на ультразвуке и формируются

дифракционные максимумы разночастотных оптических сигналов (« P_0 », « P_{+1} », « P_{-1} »). Пучки имеют одинаковое пространственное направление и проходят одинаковые оптические пути по схеме до поляризационного куба (КП). Далее оптические пучки проходят зеркала ЗО1, ЗО2, ЗО3, неподвижный оптический отражатель (НОО) и подвижный оптический отражатель (ПОО), оптический куб КО, на котором происходит интерференция двух когерентных оптических пучков. На поляризационном кубе КП происходит разделение оптических пучков, прошедших одинаковое измеряемое расстояние, по поляризации и, соответственно, по частоте.

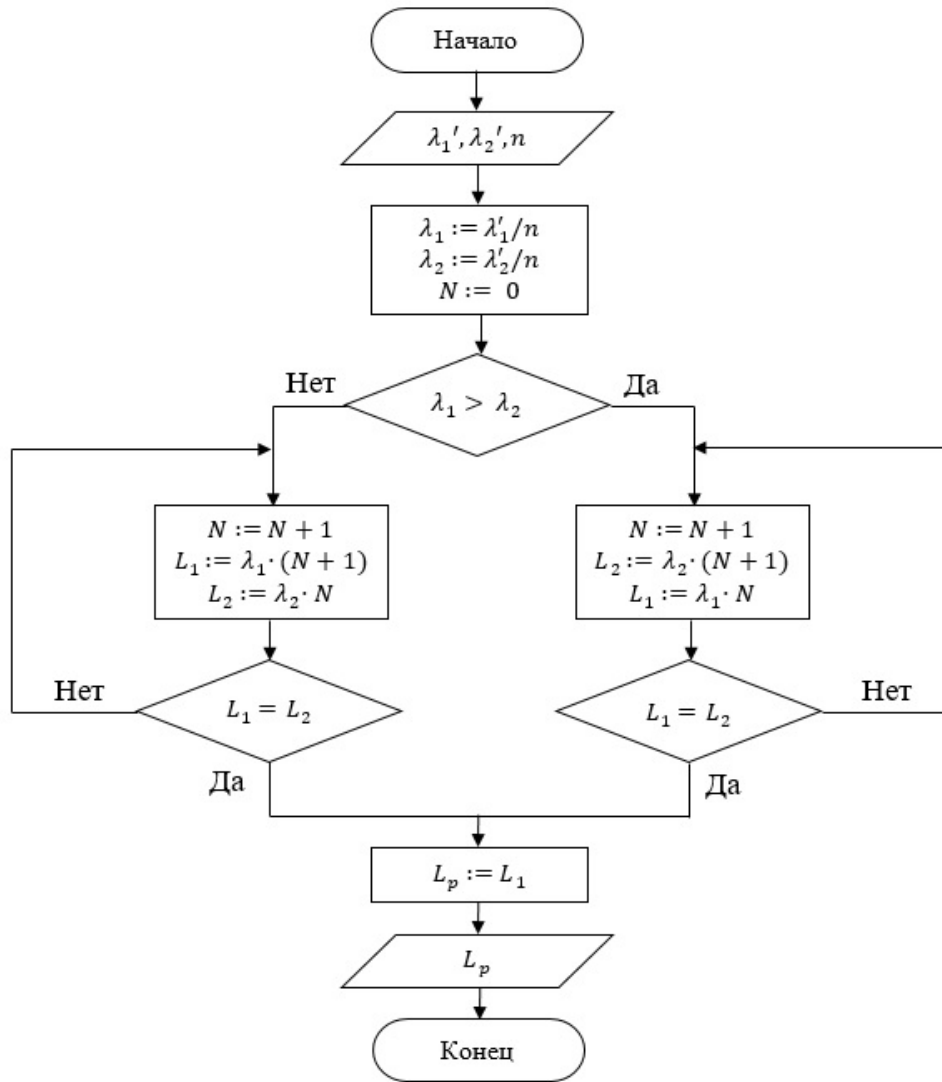


Рис. 2. Алгоритм вычисления расстояния между ближайшими пространственными точками

На первый фотоэлектрический преобразователь ФЭП1 поступает оптический сигнал с длиной волны λ_1 , а на второй фотоэлектрический преобразо-

ватель ФЭП2 – с длиной волны λ_2 . ФЭП1 и ФЭП2 формируют электрические импульсы, соответствующие пройденному расстоянию подвижного отражателя ПОО. Однако из-за того, что поляризованные оптические пучки имеют разные длины волн, фотоэлектрические преобразователи насчитывают различное количество целых длин волн оптического излучения N_1 и N_2 , причем $N_1\lambda_1 = N_2\lambda_2$.

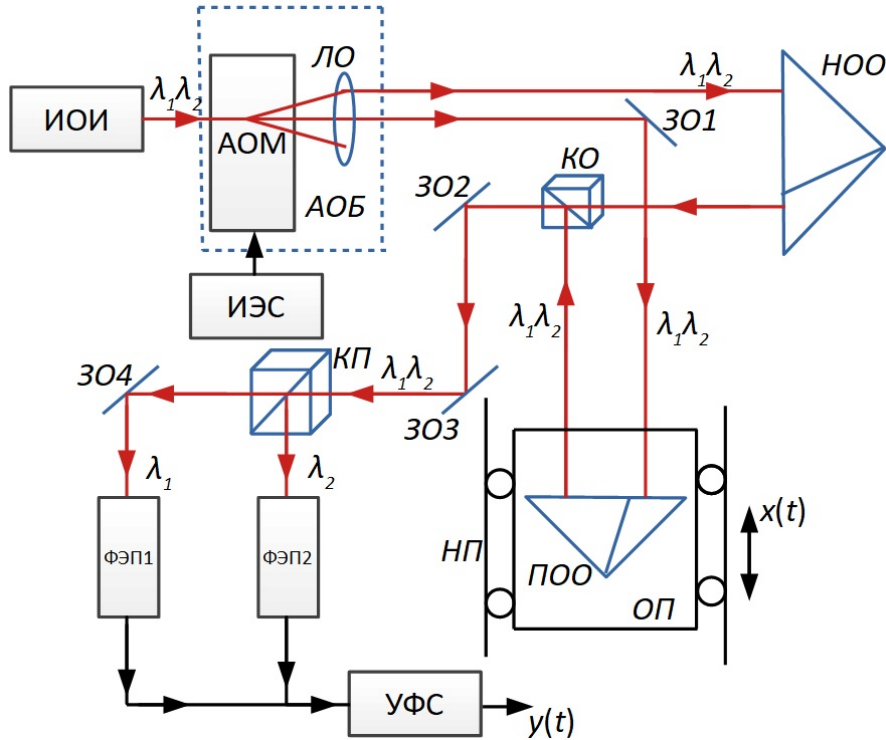


Рис. 3. Функциональная схема ОЭИИС определения пространственных точек

С выходов ФЭП1 и ФЭП2 электрические сигналы подают на узел формирования сигнала (УФС), где определяется значение разности фаз двух электрических измерительных сигналов в определенное время t . При движении ПОО значения фаз измерительных сигналов меняются, значение разности фаз двух измерительных сигналов также меняется. В момент времени, когда абсолютное значение разности фаз будет равно абсолютному значению разности фаз в момент времени t , отражатель ПОО достигнет следующей пространственной точки и в УФС будет сформирован сигнал при выполнении условия

$$\begin{cases} L_{mn} = N_1\lambda_1 = N_2\lambda_2, \\ N_1 = N_2 + 1. \end{cases} \quad (2)$$

Подставляя в эту систему уравнений действительные значения длин волн оптического излучения λ_1 и λ_2 , получаем уравнение для определения расстояния между двумя пространственными точками L_{mn} :

$$L_{mn} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (3)$$

Например, для источника оптического излучения ЛГН-303 это значение равно 0,5 м.

Так как оптический измерительный пучок проходит измеряемое расстояние дважды, к ПОО и от него, то через равные пространственные промежутки $L_{mn}/2$ УФС будет формировать электрические измерительные сигналы. По этим сигналам определяют прохождение ПОО по трассе измерения пространственных точек и абсолютное положение измеряемого объекта в пространстве в пределах одной пространственной точки.

Определено, что погрешность определения пространственных точек будет зависеть от действительного значения длин волн двух оптических пучков ИОИ и значения показателя преломления воздуха на трассе измерения.

Разработан способ снижения погрешности измерения ОЭИИС, основанный на использовании пространственных точек, расположенных по измеряемой трассе, и нониусного метода измерения, реализуемого с помощью разработанного электронного блока преобразования измерительной информации (БПИИ) (рис. 4).

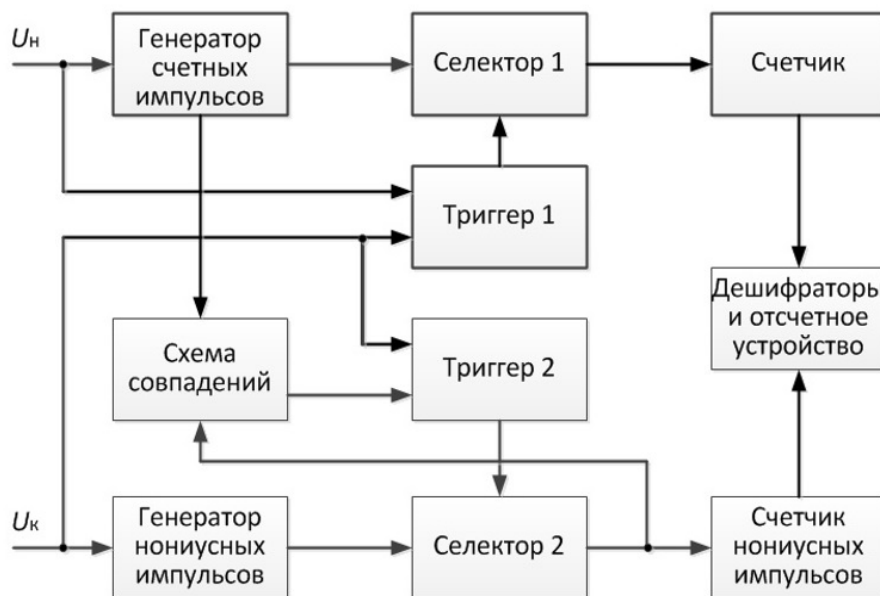


Рис. 4. Структурная схема БПИИ, реализующая способ снижения погрешности измерения ИИС

Импульс начала процесса измерения запускает генератор счетных импульсов и открывает Триггер 1. Выходной импульс триггера открывает Селектор 1 и начинается счет импульсов.

Импульс конца процесса измерения устанавливает Триггер 1 в исходное положение и счет импульсов прекращается. Этот импульс также запускает генератор нониусных импульсов (ГНИ), воздействует на Триггер 2, который открывает Селектор 2. Нониусные импульсы с ГНИ поступают на счет-

чик нониусных импульсов, схему совпадений и обладают периодом, определяемым выражением $T = (n-1)\frac{T_0}{n}$, где $\frac{T_0}{n}$ – шаг нониуса; T_0 – период следования импульсов измерительного сигнала; $n = 2, 3, 4, \dots$ Измеряемое расстояние между двумя пространственными точками L_{nn} определяется выражением: $L_{nn} = NT_0 + \Delta t_k$, где N – количество целых длин волн сигнала, уложившихся в расстоянии L_{nn} ; $\Delta t_k = \frac{kT_0}{n} - \Delta t_{кн}$, где k – коэффициент расширения нониусного счета; $\Delta t_{кн}$ – погрешность из-за несовпадения фронтов счетных и нониусных импульсов.

На графике зависимости погрешности измерения перемещения объекта ΔL от значения перемещения L линия 1 показывает погрешность измерения перемещения ОЭИИС до модернизации, линия 2 показывает погрешность измерения перемещения новой ОЭИИС с расположенными по трассе измерения пространственными точками (рис. 5).

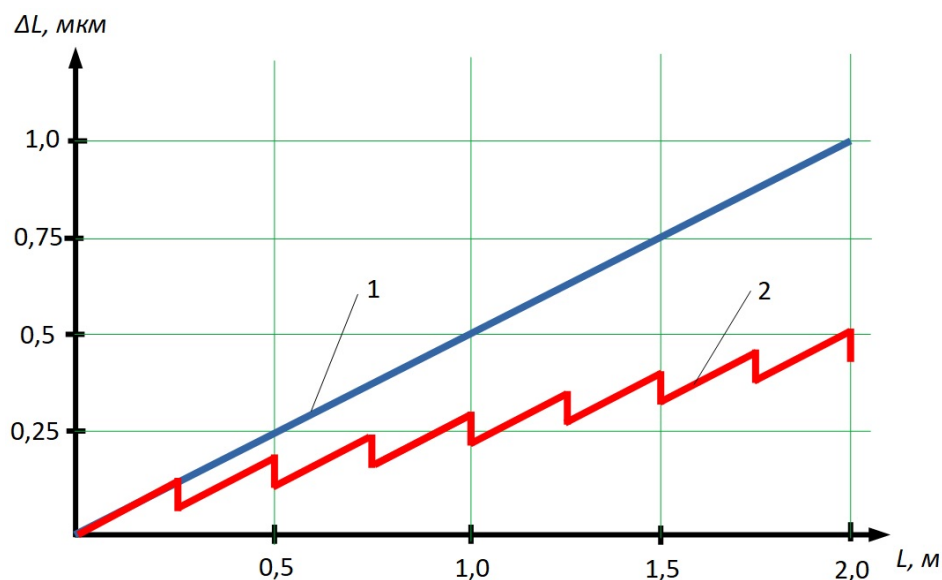


Рис. 5. График зависимости погрешности измерения перемещения объекта ΔL от значения перемещения L

Анализ полученной зависимости показал, что разработанная ИИС с расположенными по трассе измерения пространственными точками уменьшает погрешность измерения перемещения объекта в 2,5 раза.

Заключение

Применение разработанной ОЭИИС повышает точность измерения при изготовлении крупногабаритных корпусных изделий РК и АТ при случайных перерывах оптической связи или сбоях в системе сетевого питания, а также за счет уменьшения накопленной погрешности в каждой пространственной точке при прохождении подвижного отражателя по измеряемой трассе.

Список литературы

1. Сви́дерский В. П., Косов Д. С. Основы технологии изготовления крупногабаритных тонкостенных корпусных деталей РКТ с использованием комбинированной деформирующей обработки // Научные технологии производства РКТ. Вып. 2 М. : Сатурн-С, 2002. С. 33–38.
2. Самохина К. С., Капезин С. В. [и др.]. Лазерные измерительные системы с пространственно-временной разверткой интерференционного поля // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2015. № 2. С. 156–161.
3. Базыкин С. Н. Информационно-измерительные системы на основе интерферометров : монография / под ред. д-ра техн. наук, проф. В. А. Васильева. Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. 132 с.
4. Samohina K. S., Badeeva E. A., Murashkina T. I., Bazykin S. N., Bazykina N. A., Gerashenko M. S. Laser optical fiber systems prospects use evaluation // IEEE Conference: 2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). M., 2020. INSPEC: 19607010. doi:10.1109/MWENT47943.2020.9067362
5. Базыкин С. Н., Самохина К. С., Первушкина Е. С. Взаимодействие оптических и акустических волн в гетеродинных лазерных интерферометрах // СВЕТ-2013 : сб. материалов науч.-техн. конф. Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. С. 113–116.
6. Штанько А. Е., Иванова С. Д. Опτικο-электронные измерительные системы. М. : СТАНКИН, 2013. 233 с.
7. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет опτικο-электронных приборов. М. : Машиностроение, 1999. 360 с.
8. Солодовников В. А. Фазовые опτικο-электронные преобразователи. М. : Машиностроение, 1986. С. 143–144.
9. Мухамадиев А. А., Ураксеев М. А., Фаррахов Г. Акустооптические приборы информационно-измерительных систем экологического мониторинга. М. : Машиностроение, 2009. 20 с.
10. Самохина К. С., Соломатина К. Д., Эршов Х. З. [и др.]. Анализ помехоустойчивости оптических схем информационно-измерительных систем // Молодежь и наука: модернизация и инновационное развитие страны : тр. Междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2013. С. 274–279.
11. Самохина К. С., Грибков В. А. [и др.]. Рассеяние оптического поля на акустических волнах // Волоконно-оптические, лазерные и нанотехнологии в наукоемком приборостроении СВЕТ-2018 : материалы Междунар. науч.-техн. конф. Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. С. 85–92.

References

1. Sviderskiy V.P., Kosov D.S. Fundamentals of manufacturing technology for large-sized thin-walled RCT body parts using combined deforming processing. *Naukoemkie tekhnologii proizvodstva RKT. Vyp. 2 = Science-intensive production technologies of RCT. Issue 2.* Moscow: Saturn-S, 2002:33–38. (In Russ.)
2. Samokhina K.S., Kapezin S.V. [et al.]. Laser measuring systems with spatio-temporal scanning of the interference field. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2015;(2):156–161. (In Russ.)
3. Bazykin S.N. *Informatsionno-izmeritel'nye sistemy na osnove interferometrov: monografiya = Information and measuring systems based on interferometers: monograph.* Penza: Izd-vo PGU, 2014:132. (In Russ.)
4. Samohina K.S., Badeeva E.A., Murashkina T.I., Bazykin S.N., Bazykina N.A., Gerashenko M.S. Laser optical fiber systems prospects use evaluation. *IEEE Conference: 2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT).* Moscow, 2020. INSPEC: 19607010. doi:10.1109/MWENT47943.2020.9067362

5. Bazykin S.N., Samokhina K.S., Pervushkina E.S. Interaction of optical and acoustic waves in heterodyne laser interferometers. *SVET-2013: sb. materialov nauch.-tekhn. konf. = SVET-2013: proceedings of scientific and engineering conference*. Penza: Izd-vo PGU, 2013:113–116. (In Russ.)
6. Shtan'ko A.E., Ivanova S.D. *Optiko-elektronnye izmeritel'nye sistemy = Optoelectronic measuring systems*. Moscow: STANKIN, 2013:233. (In Russ.)
7. Yakushenkov Yu.G. *Teoriya i raschet optiko-elektronnykh priborov = Theory and calculation of optoelectronic devices*. Moscow: Mashinostroenie, 1999:360. (In Russ.)
8. Solodovnikov V.A. *Fazovye optiko-elektronnye preobrazovateli = Phase optoelectronic converters*. Moscow: Mashinostroenie, 1986:143–144. (In Russ.)
9. Mukhamadiev A.A., Urakseev M.A., Farrakhov G. *Akustoopticheskie pribory informatsionno-izmeritel'nykh sistem ekologicheskogo monitoringa = Acousto-optic devices of information-measuring systems of ecological monitoring*. Moscow: Mashinostroenie, 2009:20. (In Russ.)
10. Samokhina K.S., Solomatina K.D., Ereshov Kh.Z. [et al.]. Analysis of noise immunity of optical circuits of information-measuring systems. *Molodezh' i nauka: modernizatsiya i innovatsionnoe razvitie strany: tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Youth and science: modernization and innovative development of the country: proceedings of scientific and practical conference*. Penza, 2013:274–279. (In Russ.)
11. Samokhina K.S., Gribkov V.A. [et al.]. Scattering of the optical field on acoustic waves. *Volokonno-opticheskie, lazernye i nanotekhnologii v naukoemkom priborostroenii SVET-2018: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Fiber-optic, laser and nanotechnologies in science-intensive instrumentation SVET-2018: proceedings of an international scientific and engineering conference*. Penza: Izd-vo PGU, 2018:85–92. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Татьяна Ивановна Мурашкина

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры приборостроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: timurashkina@mail.ru

Tat'yana I. Murashkina

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department
of instrument engineering, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Елена Александровна Бадеева

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры бухгалтерского
учета, налогообложения и аудита,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: badeeva_elen@mail.ru

Elena A. Badeeva

Doctor of engineering sciences, associate
professor, professor of the sub-department
of accounting, taxation and audit,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Кристина Сергеевна Самохина

ассистент кафедры приборостроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: cbazykin@yandex.ru

Kristina S. Samokhina

Assistant of the sub-department
of instrument engineering, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Александр Валентинович Бадеев

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник научно-
технического центра «Нанотехнологии
волоконно-оптических систем»,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: badeyev@mail.ru

Aleksandr V. Badeev

Candidate of engineering sciences,
senior researcher of the Scientific Research
Center “Nanotechnology of fiber-optic sys-
tems”, Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Анастасия Андреевна Толова

магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: nbeshkova@mail.ru

Anastasiya A. Tolova

Master’s degree student, Penza
State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Поступила в редакцию / Received 12.01.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 07.02.2022

Принята к публикации / Accepted 25.02.2022