

УДК 621.373.876

ЛАЗЕРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

© 2014 В.И. Мордасов¹, Н.А. Сазонникова¹, А.С. Нонин²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

²Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара

С целью совершенствования контроля положений деталей при сборке, заключительных операциях и последующей эксплуатации разработана лазерная измерительная система для контроля углового положения элементов конструкции. Применительно к поставленной задаче, необходима реализация малогабаритной углоизмерительной системы, обеспечивающей высокую точность измерения (погрешность не более 1,5...2 угл. сек.) при значительной рабочей дистанции между объектом контроля и автоколлиматором (до 20 м) и относительно широком диапазоне измерения (10...12 угл. мин.). Для решения поставленной задачи выбран метод "прямой угловой засечки". Измерительный канал реализует триангуляционный метод. В соответствии с методом каждая видеокамера измеряет углы визирования лазерного диода, расположенного в контрольной точке. Контроль поверхности площадок проходит в два этапа: контроль положения посадочных мест проводится без технологических нагрузок и после проведения нагружения. В результате проведённого анализа выявлены следующие первичные погрешности, определяющие точность измерения линейных и угловых координат контролируемого объекта: погрешность измерения координат центра изображения измерительной марки на ПЗС-матрице измерительного оптико-электронного преобразователя, обусловленная шумами и дискретностью приёмной площадки, и погрешность измерения, определяемая отклонением величины фокусного расстояния объективов от номинального значения.

Лазерные измерительные системы, угловое положение, элементы конструкции.

Метрологическое обеспечение многих измерительных задач производственной и научной деятельности при создании элементов конструкций летательных аппаратов и двигателей предусматривает измерение пространственного положения объектов контроля относительно единой жёсткой базы в процессе их перемещения. Совершенствование технологий изготовления и современных средств производства летательных аппаратов и двигателей требует точного контроля положений деталей при сборке, заключительных операциях и последующей эксплуатации [1 -5].

Методику измерения пространственного положения элементов конструкции рассмотрим на примере системы измерения деформаций элементов посадочных мест под чувствительные элементы системы управления движением летального аппарата (ЧЭ СУД) (рис. 1).

Вес и температура, действующие на элементы конструкции, вызывают деформацию зеркал, изменение позиции и линейный сдвиг каждой из плоскостей зер-

кал относительного заданного положения. Для компенсации этих воздействий необходимо реализовать систему для измерения отклонения посадочных поверхностей от установленного номинала.

По методу измерения пространственных координат контролируемых объектов оптико-электронные системы (ОЭС), реализующие метод триангуляции, разделяются на системы, построенные по методу «линейных засечек», «угловых засечек» и «обратных угловых засечек» [3-5]. В ОЭС, построенной по методу «линейных засечек», производится измерение дистанции до контрольных точек объекта и только потом производится вычисление координат объекта (рис. 2). Системы «угловой засечки» и «обратной угловой засечки» измеряют углы визирования на контрольные точки объекта и после этого происходит вычисление пространственного положения объекта [2,4].

В системах «обратной угловой засечки» величины пространственных координат контрольных точек объекта опреде-

ляются в результате единой итерационной процедуры измерения и последующей обработки некоторых общих величин - координат изображений контрольных точек в одной общей плоскости анализа. В системах «угловой засечки» проводится оп-

ределение пространственных координат каждой из контрольных точек объекта по отдельности и потом за один цикл вычисляются координаты контролируемого объекта [3, 5].

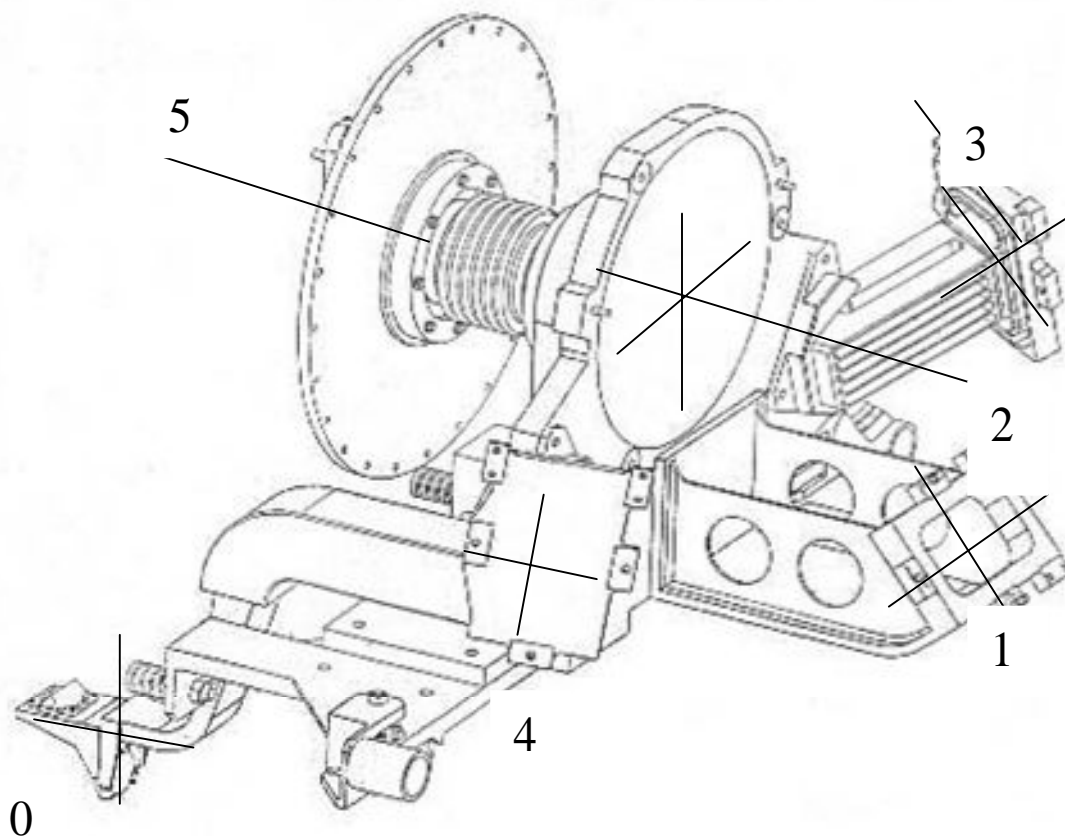


Рис. 1. Общий вид конструкции платформы с посадочными местами под ЧЭ СУД: 0 – узел подвески, 1, 3, 4 – места установки зеркал, 2, 5 – вращающиеся плоские зеркала

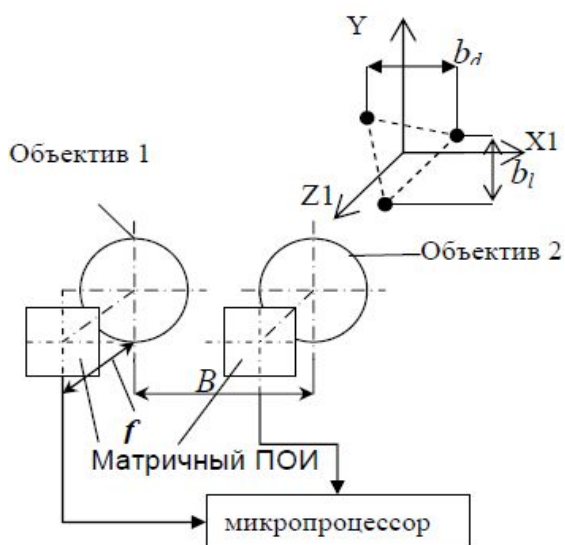


Рис. 2. Обобщённая структурная схема оптоэлектронной системы, работающей по методу триангуляции

Для контроля углового положения крупногабаритных конструкций эффективны оптоэлектронные измерительные системы. Применительно к поставленной задаче необходима реализация малогабаритной углоизмерительной системы, обеспечивающей высокую точность измерения (погрешность не более 1,5...2 угл. сек.) при значительной рабочей дистанции между объектом контроля и автоколлиматором (до 20 м) и относительно широком диапазоне измерения (10...12 угл. мин.).

Подобные системы необходимы также при решении многих задач в производственной и научной деятельности: контроле деформаций буровых платформ,

доков, фундаментов электростанций и других крупногабаритных объектов.

Однако в настоящее время отсутствуют серийные оптико-электронные измерительные системы с требуемыми метрологическими параметрами. Известно ограниченное количество схем специальных широкодиапазонных угломеров, недостатком которых является сложная схема и крупные габариты.

Чувствительность измерения в ОЭС контроля углового положения элементов конструкции обоих видов по дальности и угловым координатам прямо пропорциональна произведению базового расстояния между контрольными точками объекта (для ОЭС, работающей по методу «угловой засечки», между центрами апертур объективов двух приёмных каналов) на фокусное расстояние объектива [4,5].

Для решения поставленной задачи выбран метод "обратной угловой засечки". Метод предусматривает две ПЗС-камеры, расположенные на фиксированном расстоянии друг от друга на базовом объекте. На объекте контроля расположены элементы, определяющие его пространственное положение.

Измерительный канал реализует триангуляционный метод. В соответствии с методом каждая видеочамера измеряет углы визирования лазерного диода, расположенного в контрольной точке. Измеряются углы визирования в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Для этого ПЗС-матрицы, расположенные в фокальных плоскостях объективов видеочамер, измеряют по две координаты изображений в горизонтальной и вертикальных плоскостях изображений светодиода соответственно (рис. 3).

При решении задачи автоматизированного контроля положения с объектом связываются визирные цели, фиксирующие три и более его контрольных точки. Изображения визирных целей регистрируются оптико-электронным измерительным преобразователем, включающем в общем случае несколько измерительных каналов, с отдельными анализаторами на

основе матричных фотоприёмников, и с последующей компьютерной (микропроцессорной) обработкой видеокadra. При этом предварительная обработка измерительной информации может осуществляться в непосредственной близости от анализатора, что увеличивает помехозащищённость системы в целом и исключает избыточность информации.

В ОЭС, работающей по методу «угловой засечкой», углы визирования трёх (или более) визирных целей объекта измеряются двумя видеосистемами, каждая из которых включает матричный приёмник оптического излучения (ПОИ) (рис. 2). Обработка видеокadров выполняется микропроцессором.

Угловые поля видеосистем перекрываются, обеспечивая визирование контролируемого объекта: центры объективов видеосистем расположены на известном базовом расстоянии B .

Выполнен теоретический анализ чувствительности ОЭС двух видов к измерению линейных и угловых координат.

В частности, при условии измерительной задачи, когда система работает на дальнем участке дистанции: $L \gg B$, $L \gg b_l, b_d$ и одной измеряемой координате, чувствительность измерения ОЭС «угловой засечки» смещений x, y и дистанции L до объекта определяются выражениями: [3]

$$S_x = S_y = \frac{f}{L}, \quad (1)$$

$$S_L = \frac{B - f}{L^2}. \quad (2)$$

Выражения (1,2) справедливы и для ОЭС метода триангуляции (МТ) «обратной угловой засечки» при замене B на b_d . Чувствительность к углам поворота для ОЭС МТ «обратной угловой засечки» определяется выражением

$$S_{\Theta} = \frac{bf}{L}. \quad (3)$$

Выражение (3) определяет чувствительность измерения поворота Θ_3 при $b = b_d$ и измерения поворотов Θ_1, Θ_2 при $b = b_l$.

В ОЭС МТ «угловой засечки» величина b базы между визирными целями не известна заранее, а определяется в процессе измерения линейных координат, что

определяет потенциально большую погрешность измерения углов поворота по сравнению с ОЭС МТ «обратной угловой засечки».

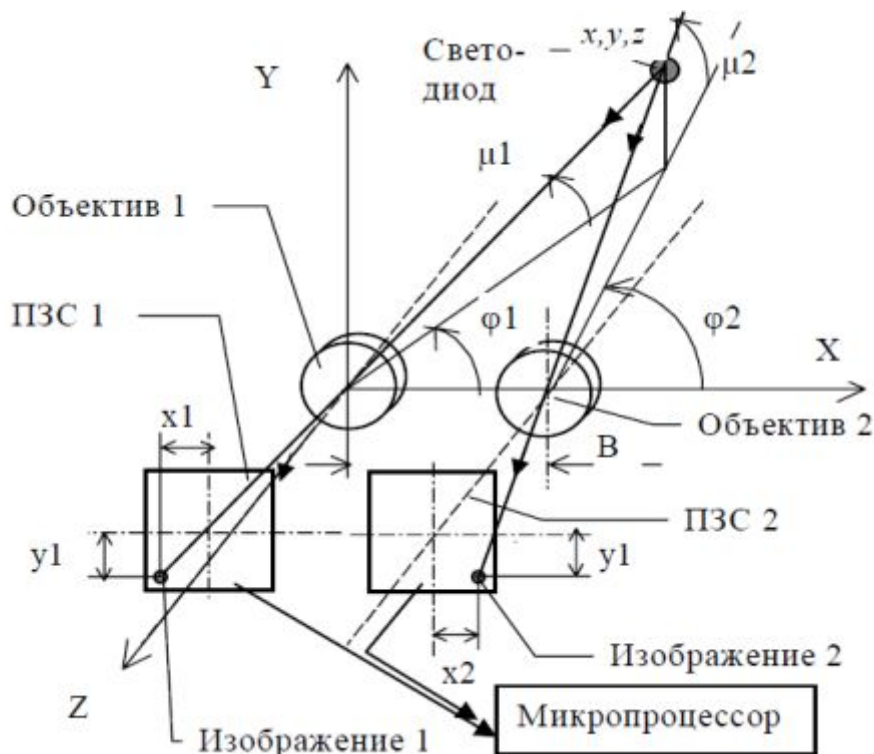


Рис. 3. Принцип работы прибора по методу «угловой засечки»

Углы визирования и координаты контрольной точки определяются следующими соотношениями:

$$\varphi_1 = \frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{x_1}{f}\right) \quad \varphi_2 = \frac{\pi}{2} + \arctg\left(\frac{x_2}{f}\right), \quad (4)$$

$$\mu_1 = \arctg\left(\frac{y_1}{f}\right) \quad \mu_2 = \arctg\left(\frac{y_2}{f}\right), \quad (5)$$

$$z = \frac{B \cdot \operatorname{tg}(-\varphi_1) \cdot \operatorname{tg}(\pi - \varphi_2)}{\operatorname{tg}(-\varphi_1) + \operatorname{tg}(\pi - \varphi_2)} \quad x = \frac{B \cdot (\pi - \varphi_2)}{\operatorname{tg}(-\varphi_1) + \operatorname{tg}(\pi - \varphi_2)}, \quad (6)$$

где

$$y = 0,5\sqrt{x^2 + z^2} \operatorname{tg}(\mu_1) + 0,5\sqrt{z^2 + (B - x)^2} \operatorname{tg}(\mu_2),$$

f - фокусное расстояние объектива, B - базовое расстояние между осями видеокамер.

Контроль поверхности площадок проходит в два этапа. На первом этапе контроль положения посадочных мест проводится без технологических нагрузок. На втором этапе контроль посадочных мест проводится после проведения испытаний. Отражающие зеркала от смещений вдоль оптической оси и от поперечных

смещений предохраняют металлические пластины, установленные на площадках. Описанный ниже способ позволяет выявить оптическим способом стабильность положения посадочных площадок под чувствительные элементы и оценить воздействие внешней среды.

На рис. 4 и 5 показаны оптические схемы измерений стабильности положения посадочных мест под чувствительные элементы. На рис. 5 представлен общий вид конструкции с посадочными местами под ЧЭ СУД.

В первом случае на рис. 4 приводится оптическая схема для определения отклонений площадки чувствительных элементов. Углы β и γ задаются из условия, что зеркала на базовой и измеряемой поверхности должны устанавливаться строго перпендикулярно оптической оси измерительного прибора 2 (например, телекамера). Угол α - находится как $\alpha = \beta - \gamma$. В данной схеме лазерный излучатель

устанавливается на теодолите и необходимо для определения точки пересечения опорной и измеряемой оси.

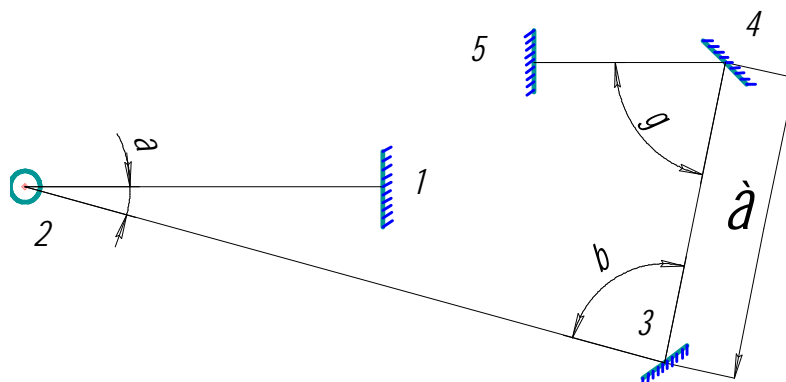


Рис. 4. Оптическая система для определения отклонений площадок конструкции подвески чувствительных элементов:
1-базовая площадка, 2-измерительный прибор, 3, 4-зеркала для определения места пересечения оптических осей, 5-исследуемая площадка

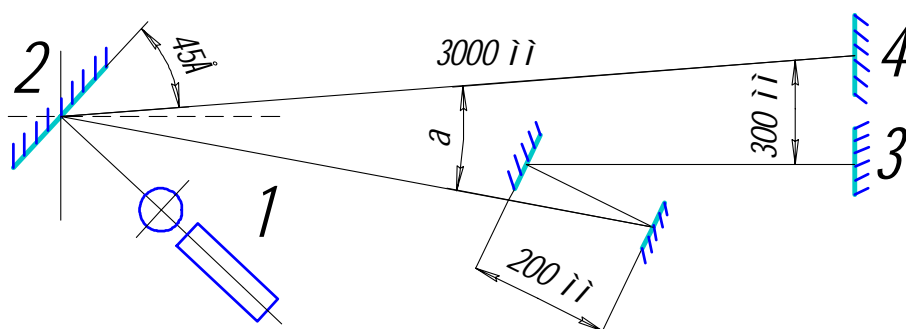


Рис. 5. Измерение положения посадочных мест под чувствительные элементы:
1 - лазер и теодолит; 2 – большое зеркало; 3 – контролируемая площадка;
4 – «базовая» площадка ($\alpha = 10^{\circ}02'34''$)

Оптические оси базовой и исследуемой площадок лежат в одной плоскости. Если они параллельны друг другу, то задаётся условие перекрестия. Расстояние и углы между зеркалами 3 и 4 в процессе проведения измерений не изменяют свою величину. На рис. 5 приводится опытная схема измерений угла между зеркалами 3 и 4 с использованием оптического усилителя (зеркало 2). После каждого вида испытаний узел посадочной площадки индивидуально устанавливается в схему вертикального контроля. При проведении испытаний требуется минимизировать деформацию поверхности зеркал от торцевых нагрузок в пределах 10". В соответствии с комплексной программой экспериментальной отработки собранный узел посадочного места зеркала подвергается испытаниям с целью подтверждения сохранности его характеристик: транспорт-

ные технологические испытания; испытания на прочность к воздействию линейных ускорений по осям X и Y (вдоль оптической оси зеркала и в поперечном направлении); испытания на кратковременные динамические ускорения по осям X и Y; испытания на прочность к воздействию пониженной (- 50°C) и повышенной (+ 50°C) температуры; термовакуумные испытания, при которых температура зеркала изменялась в пределах $\pm 5^{\circ}\text{C}$; при этом во всём диапазоне изменения температуры от +12°C до +28°C контролируется качество зеркала.

При выборе параметров лазерного излучения, расчёт которых следует провести, необходимо исходить из того, что их число должно быть минимальным, так как большой объём полученных результатов может затруднять их использование. Как правило, наибольшие изменения

аббераций имеют место для лучей, идущих на край входного зрачка и край поля изображения. Поэтому для подавляющего большинства оптических систем достаточно ограничиться расчётом следующих лучей: для точки на оси – луча, идущего на край входного зрачка, и для края поля изображения – главного луча; двух меридиональных лучей, идущих на верхний и нижний края входного зрачка (с учётом виньетирования) и одного внемеридионального луча, идущего в точку зрачка с координатами $m=0$, $M=m_{\max}$, где m_{\max} – радиус зрачка.

Для оптических систем, работающих с большой числовой апертурой (с большим относительным отверстием), целесообразно рассчитать осевой и внеосевой лучи для зоны входного зрачка с координатой $m = \sqrt{0,5m_{\max}}$. Для систем со средними и большими полями изображений следует дополнительно рассчитать лучи пучка, идущего из точки предмета с ординатой $y = \sqrt{0,5y_{\max}}$ (или при $s_1 = -\infty$ для $\mu = \sqrt{0,5\mu_{\max}}$), где y_{\max} – размер предмета, μ_{\max} – синус угла поля.

При оценке чувствительности системы к погрешностям изготовления вычисляют отклонения $\Delta\Phi_{ji}$ функций, вызванные заданными отклонениями конструктивных параметров. Эти отклонения функций определяются методом центральной разности, учитывающей возможность нелинейного изменения Φ_j . Отклонение $\Delta\Phi_{ji}$ функции при изменении параметра p_i определяется по формуле:

$$\Delta\Phi_{ji} = (\Phi_{ji}^+ - \Phi_{ji}^-), \quad (7)$$

где Φ_{ji}^+ – соответствует изменению Δp_i ; Φ_{ji}^- – соответствует изменению $-\Delta p_i$. Предполагается, что отклонение любого параметра p_i равновероятно в обе стороны от номинала, а также, что отклонения $\Delta\Phi_{ji}$ подчиняются нормальному закону распределения. Тогда средние значения отклонений функции $\Delta\Phi_{j\text{ср}}=0$, среднее суммарное отклонение любой функции $\Delta\Phi_{j\text{ср}}=0$. Тогда и суммарное отклонение

подчиняется нормальному закону. Поэтому для вычисления доверительного интервала отклонения $\Delta\Phi_j$ доводится формула теории вероятностей

$$\Delta\Phi_{j\text{ дов}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=t} (\Delta\Phi_{ji})^2}. \quad (8)$$

Суммарное отклонение $\Delta\Phi_j$ находится внутри интервала $\pm \Delta\Phi_{j\text{ дов}}$ с вероятностью 99,75%.

Если количество конструктивных параметров мало, то следует использовать максимальные изменения каждой функции, вычисляемые в программе по формуле, которая дает несколько завышенный результат

$$\Delta\Phi_{j\text{imax}} = \sum_{i=1}^{i=t} |\Delta\Phi_{ji}|. \quad (9)$$

Доверительные интервалы для каждой функции следует выдавать не только для всех параметров сразу, но и по группам: геометрические параметры (отклонение радиуса кривизны линзы, диаметра, толщины), характеристики материала (показатели преломления). Это позволяет выявить причины значительных отклонений функций и оценить возможность их уменьшения не за счёт ужесточения допусков, а путём, например, пересчёта допусков на изготовление стёкол для оптических элементов, на механическую обработку линз, комплектацию по толщинам линз.

Знание доверительных интервалов изменения аббераций и параксиальных характеристик в некоторых случаях оказывается недостаточным для оценки вероятного ухудшения качества изображения. Иногда требуется знать, являются ли изменения аббераций при малых изменениях конструктивных параметров независимыми друг от друга или между ними существует определённая линейная связь. Знание связей между изменениями функций может быть полезным и при оценке возможности компенсации аббераций при сборке путём регулирования воздушных промежутков между линзами, что широко

используется, например, при сборке объективов микроскопов.

Основными требованиями на первом этапе контроля посадочных мест под чувствительные элементы являются: диапазон измерений - от 0' до 10'. погрешность измерения - 10", измерения проводятся при нормальных условиях. Параметры окружающей среды не оказывают влияния на точность измерений при обеспечении их стабильности в следующих диапазонах: по температуре - $\pm 5^\circ\text{C}$; по влажности - $\pm 5\%$; по давлению - ± 10 мм. рт. ст., допустимая амплитуда виброперемещений – не более 5 мм на дистанции 20 м. Система измерений должна позволять производить измерения перемещений по трём координатам, при этом взаимное расположение измеряемых элементов может быть произвольным без ограничения на степень свободы.

Экспериментальные исследования проводились согласно схеме на рис. 4. При отработке методики использовался теодолит 2Т2А, излучатель – полупроводниковый лазер IDL5S-640. Точность из-

мерений составляла 3". При длине базовой оси 3 м влияние внешних воздействий не наблюдается.

В результате проведённого анализа выявлены следующие первичные погрешности, определяющие точность измерения линейных и угловых координат контролируемого объекта: погрешность измерения координат центра изображения измерительной марки на ПЗС-матрице измерительного оптико-электронного преобразователя, обусловленная шумами и дискретностью приёмной площадки, и погрешность измерения, определяемая отклонением величины фокусного расстояния объективов от номинального значения.

Таким образом, разработанная методика контроля положений посадочных мест с использованием полупроводникового лазера позволяет сократить трудоёмкость испытаний, в том числе процесса наладки системы, в 3 – 4 раза. При этом точность измерений системы составляла 0,1", при длине базовой оси 3 м влияние внешних воздействий не наблюдается.

Библиографический список

1. Ворона А.М., Коняхин И.А. Исследование регулярного виньетирования в оптико-электронных системах измерения угловых деформаций крупногабаритных конструкций // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 14-18.

2. Аникст Д.А., Константинович К.М., Меськин И.В. Высокоточные угловые измерения. М.: Машиностроение, 1987. 480 с.

3. Михеев С.В., Коняхин И.А. Моделирование оптической системы измерения координат объекта методом обратной ли-

нейной засечки // Сборник трудов VI Международной конференции "Прикладная оптика". Т. 1. «Оптическое приборостроение». СПб.: НИУ ИТМО, 2004. С. 335-338.

4. Коняхин И.А. Панков Э.Д. Трёхкоординатные оптические и оптико-электронные угломеры. М.: Недра, 1991. 224 с.

5. Михеев С.В. Моделирование оптической системы измерения координат объекта методом обратной угловой засечки // Сборник трудов II межвузовской конференции молодых ученых. Том 3. СПб.: НИУ ИТМО, 2005. С. 164-167.

Информация об авторах

Мордасов Василий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный ис-

следовательский университет). Область научных интересов: создание лазерных информационно-измерительных систем, исследование взаимодействия высокоэнергетических потоков излучения с твёрдыми веществами.

Сазонникова Надежда Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: nasazonnikova@yandex.ru. Область научных интересов:

создание лазерных информационно-измерительных систем.

Нонин Александр Сергеевич, начальник сектора, Ракетно-космический центр «Прогресс». Область научных интересов: лазерные информационно-измерительные системы для контроля положения элементов конструкций.

LASER MEASUREMENT SYSTEMS FOR STRUCTURAL ELEMENTS' SPACING CHECK

© 2014 V.I. Mordasov¹, N.A. Sazonnikova¹, A.S. Nonin²

¹Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

²Rocket and Space Center "Progress", Samara, Russian Federation

In order to improve monitoring of the provisions of parts during assembly, final operations and subsequent operation the laser measuring system is designed to control the angular position of the structure. In relation to the task, it is necessary to realize a small-sized measuring rotary system providing high accuracy (error of not more than 1.5...2 angular seconds) when significant working distance between the test object and the autocollimator (up to 20 meters) and a relatively wide measurement range (10...12 angular. minutes). The method of "straight angled serifs" was constructed to solve this problem. Measuring channel implements a triangulation method. In accordance with the method of each video camera measures the viewing angles of the laser diode located at the checkpoint. Control surface areas has two phases: the control position of seats held without technological loads and after loading. In the result of the revealed analysis the following primary errors were established to determine the precision measurement of linear and angular coordinates of the test object: the measurement error of the coordinates of the center of the image of the measuring mark on the CCD matrix measuring opto-electronic transducer, due to noise and resolution the receiving area and the measurement uncertainty is determined by the deviation of the focal length of the lens from the nominal value.

Laser measuring systems, the angular position, structural elements.

References

1. Vorona A.M., Konyahin I.A. Research of a Regular Vignetting in Optoelectronic Systems of Measurement of Angular Deformations // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye*. 2008. V. 51, no. 9. P. 14-18. (In Russ.)
2. Anikst D.A. Konstantinovich K.M., Meskin I.V. *Vysokotochnye uglovyie izmereniya* [Precision angular measurements]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1987. 480 p.
3. Mikheev S.V., Konyahin I.A. Simulation of optical measurement system coordinates of the object by the inverse linear serifs // *Proceedings of VI International Conference "Applied Optics"* V. 1. "Optical Instrumentation". Saint-Petersburg: University ITMO (National Research University) Publ., 2004. P. 335-338. (In Russ.)
4. Konyahin I.A. Pankov E.D. *Trekhkoordinatnye opticheskie i optikoelektronnyie uglomery* [Triaxial optical and opto-electronic goniometers]. Moscow: Nedra Publ., 1991. 224 p.
5. Mikheev S.V. *Modelirovaniye opticheskoy sistemy izmereniya koordinat ob'ekta metodom obratnoy uglovoj zasechki* // *Sbornik trudov II mezhvuzovskoy konferentsii molodykh uchenykh*. V. 3. St. Petersburg: University ITMO (National Research University) Publ., 2005. P. 164-167. (In Russ.)

About the authors

Mordasov Vasily Ivanovich, Doctor of Science (Engineering), Professor of Automatic systems of energy devices department of Samara State Aerospace University. Area of Research: laser information and measurement systems, creation and investigation of high-energy flows and hard materials interaction.

Sazonnikova Nadezhda Aleksandrovna, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of Automatic systems of

energy devices department of Samara State Aerospace University. E-mail: nasazonnikova@yandex.ru. Area of Research: laser information and measurement systems.

Nonin Alexander Sergeevich, the head of sector in Rocket and Space Center "Progress". Area of Research: laser information-measuring systems to control the position of structural elements.