

ЛАЗЕРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Н.А. Сазонникова, А.С. Нонин, А.С. Ткаченко, Д.Н. Вобликов

С целью совершенствования контроля положений деталей при сборке и эксплуатации разработана лазерная измерительная система контроля углового положения элементов конструкции. Реализована малогабаритная углоизмерительная система с высокой точностью измерения (погрешность $\leq 2'$) при дистанции между объектом контроля и автоколлиматором до 20 м и диапазоне измерения (10...12). Задача решена методом "прямой угловой засечки". В результате анализа выявлена погрешность измерения координат центра изображения на ПЗС-матрице измерительного прибора.

Ключевые слова: 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) (рисунок 1).

Вес и температура, действующие на элементы конструкции, вызывают деформацию зеркал, изменение позиции и линейный сдвиг каждой из плоскостей зеркал относительно заданного положения. Для компенсации этих воздействий необходимо реализовать систему для измерения отклонения посадочных поверхностей от установленного номинала.

По методу измерения пространственных координат контролируемых объектов оптоэлектронные 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 (рисунок 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 определяются 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» определение пространственных координат каждой из контрольных точек объекта по отдельности и потом за один цикл вычисляются координаты контролируемого объекта [3, 5].

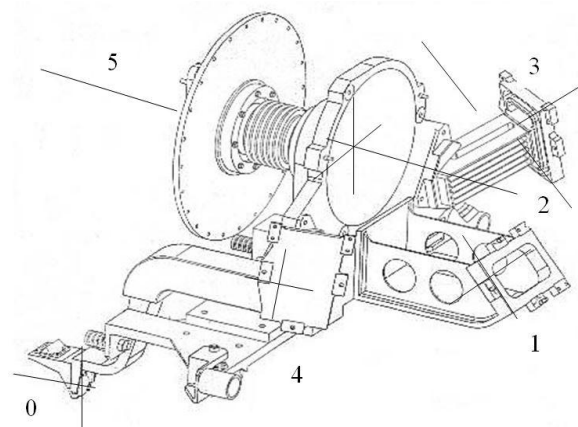


Рисунок 1 – Общий вид конструкции платформы с посадочными местами под ЧЭ СУД: 0 – узел подвески, 1, 3, 4 – места установки зеркал, 2, 5 – вращающиеся плоские зеркала

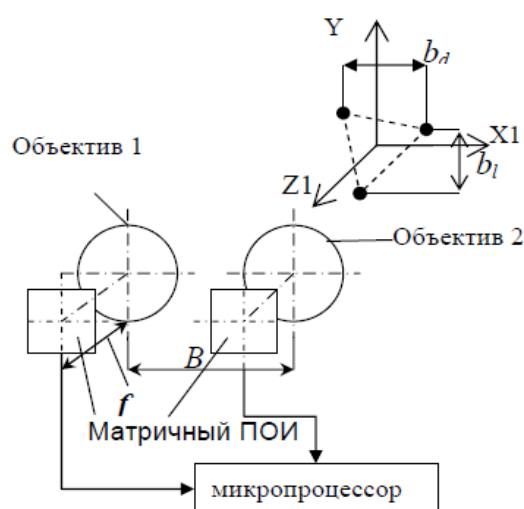


Рисунок 2 – Обобщённая структурная схема оптико-электронной системы, работающей по методу триангуляции

Для контроля углового положения крупногабаритных конструкций эффективны оптико-электронные 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 приемных 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 видеокамера 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 видеокамер, измеряют по две координаты изображений в горизонтальной и вертикальных плоскостях изображений светодиода соответственно (рисунок 3).

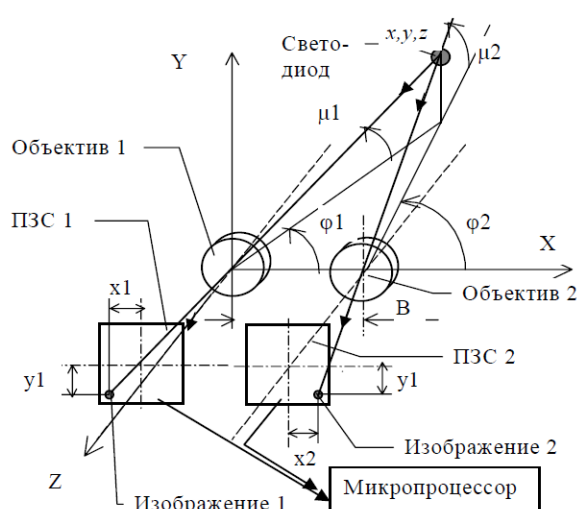


Рисунок 3 – Принцип работы прибора по методу «угловой засечки»

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 фотоприемников, и с последующей компьютерной (микропроцессорной) обработкой видеокдра. 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) (рисунок 2). Обработка видеокд-ров выполняется микропроцессором.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3 2015

ЛАЗЕРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

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».

Углы визирования и координаты контрольной точки определяются следующими соотношениями:

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

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

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

где

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

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

Контроль поверхности площадок проходит в два этапа. На первом – контроль положения посадочных мест проводится без технологических нагрузок. На втором этапе кон-

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

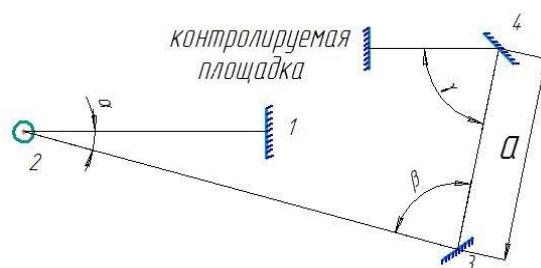


Рисунок 4 – Оптическая система для определения отклонений площадок конструкции подвески чувствительных элементов: 1 – базовая площадка, 2 – измерительный прибор, 3, 4 – зеркала для определения места пересечения оптических осей, 5 – исследуемая площадка

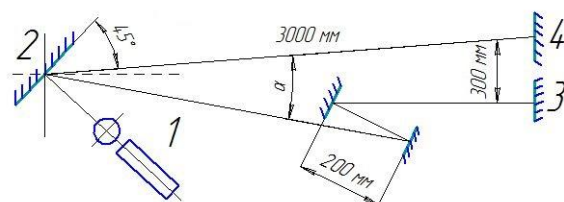


Рисунок 5 – Измерение положения посадочных мест под чувствительные элементы: 1 – лазер и теодолит; 2 – большое зеркало; 3 – контролируемая площадка; 4 – «базовая» площадка ($\alpha = 10^\circ 02' 34''$)

В первом случае на рисунке 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 не-

обходим для определения точки пересечения опорной и измеряемой оси.

Оптические оси базовой и исследуемой площадок лежат в одной плоскости. Если они параллельны друг другу, то задается условие перекрестия. Расстояние и углы между зеркалами 3 и 4 в процессе проведения измерений не изменяют свою величину. На рисунке 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: транспортные 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 ±5 °C; при этом во всем 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 аберраций 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, $\mu_{\max}$ – 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 $\Delta\Phi_{\text{ср}}=0$. Тогда и суммарное отклонение подчиняется нормальному закону. Поэтому для вычисления доверительного интервала отклонения $\Delta\Phi_{\text{дов}}$ используется формула теории вероятностей

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

Суммарное отклонение $\Delta\Phi_j$ находится внутри интервала $\pm \Delta\Phi_{\text{дов}}$ 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:

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

Доверительные интервалы для каждой функции следует выдавать не только для всех параметров сразу, но и по группам: $\Delta r/r$, N , Δd , $\Delta n_{\lambda 0}$, $\Delta(n_{\lambda 1}-n_{\lambda 2})$. Это позволяет выявить причины значительных отклонений функций и оценить возможность их уменьшения не за счёт ужесточения допусков, а путём, например, пересчёта на плавки стекол, на радиусы имеющихся пробных стекол, 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 трем координатам, при этом взаимное расположение измеряемых элементов может быть произвольным без ограничения на степень свободы.

Экспериментальные исследования проводились согласно схеме на рисунке 4. При отработке методики использовался теодолит 2Т2А, излучатель – полупроводниковый лазер IDL5S-640. Точность измерений 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'', а при длине базовой

оси 3 м влияние внешних воздействий не наблюдается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ворона, А. М. Исследование регулярного виньетирования в оптико-электронных системах измерения угловых деформаций крупногабаритных конструкций / А. М. Ворона, И. А. Коняхин // Изв. ВУЗов. «Приборостроение». – 2008. – Т. 51, № 9. – С. 14–18.

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

3. Михеев, С. В. Моделирование оптической системы измерения координат объекта методом обратной линейной засечки / С. В. Михеев, И. А. Коняхин // Сборник трудов VI Международной конференции «Прикладная оптика» 18-21 октября 2004 г. СПб, Т.1 "Оптическое приборостроение". СПб.: 2004. – С. 335–338.

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

5. Михеев С. В. Моделирование оптической системы измерения координат объекта методом обратной угловой засечки / С. В. Михеев // Сборник трудов II межвузовской конференции молодых учёных 28–31 марта 2005 г. / Под ред. В. Л. Ткалич. – Том 3. – СПб.: СПбГУ ИТМО, – 2005. – С. 180–183.

Сазонникова Н.А. – к.т.н., доцент кафедры автоматических систем энергетических установок Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С.П. Королёва (нац. исследовательского университета), тел. 8-(846) 267-46-65, nasazonnikova@yandex.ru.

Нонин А.С. – аспирант кафедры автоматических систем энергетических установок Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С.П. Королёва (нац. исследовательского университета), зам. начальника отдела – начальник сектора АО «РКЦ «Прогресс», тел. 8-927-701-63-51, aleksandr-nonin@mail.ru;

Ткаченко А.С. – аспирант кафедры автоматических систем энергетических установок Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С.П. Королёва (нац. исследовательского университета), ведущий инженер-конструктор АО «РКЦ «Прогресс», тел. 8-927-655-01-44, tkachenko-as@bk.ru;

Вобликов Д.Н. – аспирант кафедры автоматических систем энергетических установок Самарского гос. аэрокосмического университета им. акад. С.П. Королёва (нац. исследовательского университета), инженер-конструктор АО «РКЦ «Прогресс», тел. 8-927-708-42-08, rndm22@mail.ru