

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕТОДАЛЬНОМЕРОВ ФАЗОВОГО ТИПА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ОСЕВОЙ И КРУГОВОЙ СИММЕТРИЕЙ

В.Н. Шмаров

(Национальный авиационный университет, Киев)

Рассмотрена работа четырехканальных и пятиканальных фазовых светодальномеров. Показано, что с помощью таких измерительных систем возможно восстановление формы крупногабаритных объектов сферической и цилиндрической формы.

четыреканальные и пятиканальные фазовые светодальномеры, крупногабаритные объекты сферической и цилиндрической формы

Введение. Решение задачи восстановления формы поверхности крупногабаритных объектов, как было показано в работах [1 – 3], возможно с использованием многоканальных фазовых светодальномеров. Однако, результаты проведенных исследований были ограничены рассмотрением измерительных систем с тремя фазовыми светодальномерами. При этом было показано, что с помощью таких систем успешно решаются задачи восстановления формы объектов, у которых поверхность представлена совокупностью плоскостей. Однако, с точки зрения диагностики объектов с возможностью проведения оценок их эксплуатационных характеристик, значительный интерес представляет определение геометрических характеристик более сложной формы. Это касается не только необходимости определения отклонений геометрических характеристик самих крупногабаритным объектам сложной формы от первоначальных значений, но и, что зачастую бывает более важно, определения характеристик поверхностных дефектов, которые имеют сложную геометрическую форму. Для решения подобных задач, очевидно, требуется использование систем с большим числом каналов и более сложный математический аппарат обработки результатов измерений.

В данной статье будет продолжено исследование многоканальных измерительных систем, на основе фазовых светодальномеров, и их возможностей при восстановлении формы поверхностей крупногабаритных объектов. При этом будут рассматриваться объекты более сложной формы, чем объекты проанализированные в работах [1 – 3]. К таким объектам

относятся объекты, форма поверхности которых имеет сферический или цилиндрический вид. При рассмотрении таких поверхностей возникают новые задачи, связанные, например, с определением радиуса сферы и положения ее центра, определения радиуса цилиндра и положения его оси.

Несмотря на то, что и сфера, и цилиндр являются строгими модельными и, соответственно, идеализированными поверхностями, результаты проводимого исследования могут быть распространены и на произвольные поверхности с той лишь разницей, что для произвольных поверхностей будут определяться уже локальные характеристики, когда для анализируемого участка поверхности характерным является сферическое или цилиндрическое асимптотическое поведение. Это в первую очередь относится к дефектам, которые представляют собой прогибы, возникающие вследствие контактного взаимодействия объектов с различными телами. Такие прогибы могут быть изотропными, а значит близкими к сферической поверхности, или же они могут быть вытянутыми и тогда их форма будет близка к цилиндрической форме.

Понятно, что рассмотрение сферических и цилиндрических поверхностей является частной задачей и не исключает всех возможных вариантов формы поверхностей крупногабаритных объектов и тем более, вариантов образующихся на них дефектов. Однако обратим внимание на нетривиальный случай поверхности, имеющей вид седловой точки. Для области седловых точек приближение о сферичности поверхности вообще не допустимо. Но приближение о цилиндрическом характере поведения поверхности применимо, если предположить, что ось цилиндра изгибается.

Целью настоящей работы является изучение работы четырех- и пятиканальных фазовых измерительных светодальномеров для восстановления формы поверхности сложной формы. При этом будет показано, что для определения параметров сферической поверхности измерительная система должна иметь не меньше четырех каналов, а для определения параметров цилиндрической поверхности число измерительных каналов должно быть не менее пяти.

1. Описание работы четырехканального фазового светодальномера. Использование четырехканальной измерительной системы, на основе фазовых дальномеров, позволяет, естественно, определять координаты четырех точек исследуемой поверхности. Измерение координат осуществляется путем регистрации световой волны, отраженной от поверхности, при помощи четырех фотоприемников измерительной системы. Для этого поверхность предварительно освещают, например, двухмодовым лазером. Каждый из фотоприемников регистрирует достаточно узкие пучки света, относящиеся к малым участкам исследуемой поверхности (такие

малые участки поверхности будем называть ее точками). При этом величины расстояний от фотоприемников до исследуемых точек, расположенных на поверхности, определяется по разности фаз принятых и излучаемой световых волн. Причем разность фаз определяется по низкочастотной моде лазерного излучения.

На рис. 1 приведена схема четырехканальной измерительной системы. Она является модификацией трехканальной измерительной системы, работа которой рассматривалась в работе [3]. Три направления измерения расстояний к точкам поверхности, задаваемые ориентациями фотоприемников $\Phi\Pi_1$, $\Phi\Pi_2$ и $\Phi\Pi_3$ лежат на ребрах трехгранной призмы с вершиной в точке O . При этом фотоприемники равноудалены от вершины на расстояние, которое на рис. 1 обозначено как ℓ_0 . Кроме того, одинаковыми являются и расстояния между самими фотоприемниками. Поэтому углы в вершине рассматриваемой призмы также будут одинаковыми. С помощью фотоприемников $\Phi\Pi_1$, $\Phi\Pi_2$ и $\Phi\Pi_3$ измеряются расстояния ℓ_1 , ℓ_2 , ℓ_3 до трех точек поверхности A , B , C .

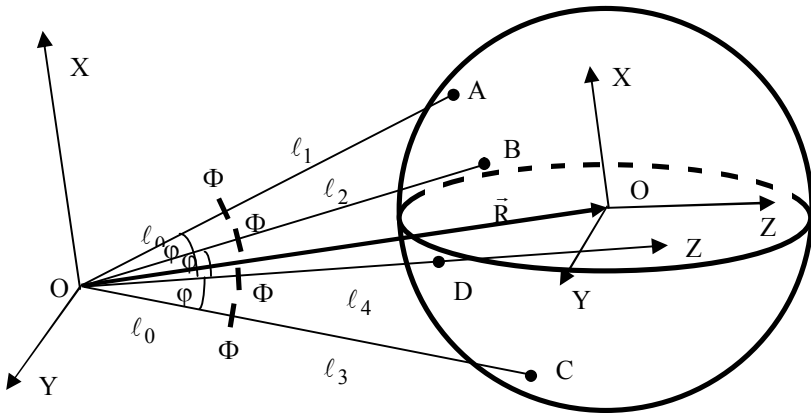


Рис. 1. Схема измерений четырехканального фазового светодальномера

Фотоприемник $\Phi\Pi_4$ ориентирован на точку D поверхности и измеряет расстояние ℓ_4 до этой точки. Направление, вдоль которого производится измерение этим фотоприемником, отвечает высоте призмы, образованной точкой O и первыми тремя фотоприемниками. Кроме этого $\Phi\Pi_4$ расположен на расстоянии ℓ_0 от точки O . При определении положения исследуемых точек поверхности введем систему координат, оси которой свяжем с измерительной системой. Начало системы координат разместим в точке O .

Ось Z направим вдоль высоты рассмотренной призмы. При этом ФП₄ будет лежать на этой оси. Ось X лежит в плоскости, образованной направлениями, вдоль которых проводятся измерения первым и четвертым фотоприемниками, а ось Y – перпендикулярна осям X и Z . Углы, которые образуют направления измерения расстояний первых трех фотоприемников (ребра трехгранной призмы) с направлением измерения ФП₄ или осью Z , равны между собой и они на рис. 1 обозначены как φ .

После измерения расстояний к исследуемым точкам поверхности координаты точек A, B, C, D , в таком образом введенной системе координат, будут иметь вид:

$$A = ((\ell_0 + \ell_1)\sin\varphi, 0, (\ell_0 + \ell_1)\cos\varphi); \quad (1)$$

$$B = (-1/2(\ell_0 + \ell_2)\sin\varphi, \sqrt{3}/2(\ell_0 + \ell_2)\sin\varphi, (\ell_0 + \ell_2)\cos\varphi); \quad (2)$$

$$C = (-1/2(\ell_0 + \ell_3)\sin\varphi, -\sqrt{3}/2(\ell_0 + \ell_3)\sin\varphi, (\ell_0 + \ell_3)\cos\varphi); \quad (3)$$

$$D = (0, 0, \ell_0 + \ell_4). \quad (4)$$

В системе координат, совмещенной с центром сферы, уравнение, описывающее сферу (на рис. 1 оси этой системы обозначены $X'Y'Z'$), записывается в виде

$$(x')^2 + (y')^2 + (z')^2 = r^2, \quad (5)$$

где x', y', z' – координаты точек сферы в системе $X'Y'Z'$, а r – радиус сферы.

Обозначим x_0, y_0, z_0 – координаты центра сферы в собственной системе координат связанной с измерительной системой. Эти координаты отвечают вектору \vec{R} перемещения точки O собственной системы координат XYZ к точке O' системы $X'Y'Z'$. С учетом такой связи координатных систем уравнение сферы в собственной системе координат измерительной системы (XYZ) запишется в виде

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2. \quad (6)$$

Выражение (6) содержит четыре неизвестных: три координаты x_0, y_0, z_0 и радиус r . Определим эти неизвестные, подставляя координаты точек A, B, C, D , в соответствии с выражениями (1) – (3) и (4), в уравнение (6). Получим систему, которая содержит четыре уравнения

$$((\ell_0 + \ell_1)\sin\varphi - x_0)^2 + (y_0)^2 + ((\ell_0 + \ell_1)\cos\varphi - z_0)^2 = r^2; \quad (7)$$

$$(1/2(\ell_0 + \ell_2)\sin\varphi + x_0)^2 + (\sqrt{3}/2(\ell_0 + \ell_2)\sin\varphi - y_0)^2 + ((\ell_0 + \ell_2)\cos\varphi - z_0)^2 = r^2; \quad (8)$$

$$(1/2(\ell_0 + \ell_3)\sin\varphi + x_0)^2 + (\sqrt{3}/2(\ell_0 + \ell_3)\sin\varphi + y_0)^2 + ((\ell_0 + \ell_3)\cos\varphi - z_0)^2 = r^2; \quad (9)$$

$$(x_0)^2 + (y_0)^2 + (\ell_0 + \ell_4 - z_0)^2 = r^2. \quad (10)$$

Решение системы уравнений (7) – (10) проведем следующим образом. Вычтем из уравнений (7), (8) и (9) уравнение (10). При этом вместо нелинейной системы уравнений (7) – (10) получим систему трех (уже линейных) уравнений с тремя неизвестными, которая имеет вид

$$\begin{aligned} 2(\ell_0 + \ell_1)\sin\varphi x_0 + 2((\ell_0 + \ell_1)\cos\varphi - (\ell_0 + \ell_4))z_0 = \\ = (2\ell_0 + \ell_1 + \ell_4)(\ell_1 - \ell_4); \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} (\ell_0 + \ell_2)\sin\varphi x_0 - \sqrt{3}(\ell_0 + \ell_2)\sin\varphi y_0 + 2(\ell_0 + \ell_4 - (\ell_0 + \ell_2)\cos\varphi)z_0 = \\ = (2\ell_0 + \ell_2 + \ell_4)(\ell_4 - \ell_2); \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} (\ell_0 + \ell_3)\sin\varphi x_0 + \sqrt{3}(\ell_0 + \ell_3)\sin\varphi y_0 + 2(\ell_0 + \ell_4 - (\ell_0 + \ell_3)\cos\varphi)z_0 = \\ = (2\ell_0 + \ell_3 + \ell_4)(\ell_4 - \ell_3). \end{aligned} \quad (13)$$

Для нахождения корней системы уравнений (11), (12) и (13) рассмотрим определители, построенные с помощью коэффициентов при неизвестных в рассматриваемой системе. Эти определители имеют вид

$$\Delta = 2\sqrt{3}\sin^2\varphi \begin{vmatrix} 2(\ell_0 + \ell_1) & 0 & -(\ell_0 + \ell_4 - (\ell_0 + \ell_1)\cos\varphi) \\ \ell_0 + \ell_2 & -(\ell_0 + \ell_2) & \ell_0 + \ell_4 - (\ell_0 + \ell_2)\cos\varphi \\ \ell_0 + \ell_3 & \ell_0 + \ell_3 & \ell_0 + \ell_4 - (\ell_0 + \ell_3)\cos\varphi \end{vmatrix}; \quad (14)$$

$$\Delta_1 = 2\sqrt{3}\sin\varphi \begin{vmatrix} -(2\ell_0 + \ell_1 + \ell_4)(\ell_4 - \ell_1) & 0 & -(\ell_0 + \ell_4 - (\ell_0 + \ell_1)\cos\varphi) \\ (2\ell_0 + \ell_2 + \ell_4)(\ell_4 - \ell_2) & -(\ell_0 + \ell_2) & \ell_0 + \ell_4 - (\ell_0 + \ell_2)\cos\varphi \\ (2\ell_0 + \ell_3 + \ell_4)(\ell_4 - \ell_3) & \ell_0 + \ell_3 & \ell_0 + \ell_4 - (\ell_0 + \ell_3)\cos\varphi \end{vmatrix}; \quad (15)$$

$$\Delta_2 = 2\sin\varphi \begin{vmatrix} 2(\ell_0 + \ell_1) & -(2\ell_0 + \ell_1 + \ell_4)(\ell_4 - \ell_1) & -(\ell_0 + \ell_4 - (\ell_0 + \ell_1)\cos\varphi) \\ \ell_0 + \ell_2 & (2\ell_0 + \ell_2 + \ell_4)(\ell_4 - \ell_2) & \ell_0 + \ell_4 - (\ell_0 + \ell_2)\cos\varphi \\ \ell_0 + \ell_3 & (2\ell_0 + \ell_3 + \ell_4)(\ell_4 - \ell_3) & \ell_0 + \ell_4 - (\ell_0 + \ell_3)\cos\varphi \end{vmatrix}; \quad (16)$$

$$\Delta_3 = \sqrt{3}\sin^2\varphi \begin{vmatrix} 2(\ell_0 + \ell_1) & 0 & -(2\ell_0 + \ell_1 + \ell_4)(\ell_4 - \ell_1) \\ \ell_0 + \ell_2 & -(\ell_0 + \ell_2) & (2\ell_0 + \ell_2 + \ell_4)(\ell_4 - \ell_2) \\ \ell_0 + \ell_3 & \ell_0 + \ell_3 & (2\ell_0 + \ell_3 + \ell_4)(\ell_4 - \ell_3) \end{vmatrix}. \quad (17)$$

Теперь, в соответствии с полученными выражениями для определителей, записанных с использованием коэффициентов уравнений (11), (12) и (13), решения этих уравнений записываются в виде

$$x_0 = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad y_0 = \frac{\Delta_2}{\Delta}; \quad z_0 = \frac{\Delta_3}{\Delta}. \quad (18)$$

Из уравнения (10) получим, что радиус сферической поверхности определяется выражением

$$r = \frac{1}{\Delta} \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + ((\ell_0 + \ell_4)\Delta - \Delta_3)^2}. \quad (19)$$

Таким образом, использование четырехканальной измерительной системой для определения четырех координат точек сферической поверхности является достаточным для восстановления этой поверхности и нахождения ее геометрических характеристик.

2. Описание работы пятиканального фазового светодальномера.

Если форма поверхности близка к цилиндрической, то для ее изучения нужно использовать уже пятиканальную измерительную систему. При этом с точки зрения геометрического анализа для таких поверхностей необходимо проведение рассмотрения двух сечений, осуществляемых взаимно перпендикулярными плоскостями. Сечение каждой плоскости с поверхностью даст некоторую кривую в пространстве, которая принадлежит плоскости сечения, то есть является плоской кривой. Для каждой такой кривой при известных координатах нескольких точек на ней можно определить радиус ее кривизны. При этом совершенно очевидно, что для нахождения радиуса кривизны кривой достаточно взять координаты трех точек, лежащих на ней. Поскольку будет рассмотрено два плоских сечения поверхности, то, следовательно, будут определены два радиуса кривизны двух кривых, получаемых при сечениях поверхности взаимно перпендикулярными плоскостями. Для этого с помощью измерительной системы необходимо определить координаты пяти точек на поверхности, так как одна точка может быть общей для обоих сечений. Таким образом, измерительная система должна содержать пять фотоприемников.

Схема пятиканальной измерительной системы, содержащей пять фотоприемников, приведена на рис. 2. Как и в предыдущем случае, считаем, что направления, вдоль которых проводятся измерения расстояний до точек поверхности, задаваемых ориентацией фотоприемников, пересекаются в точке, которая обозначена на рис. 1 точкой O . Все пять фотоприемников равноудалены от точки O на одинаковое расстояние ℓ_0 .

Также отметим, что четыре фотоприемника измерительной системы ($\Phi\Pi_1$, $\Phi\Pi_2$, $\Phi\Pi_4$, $\Phi\Pi_5$) являются основанием четырехгранной призмы, вершина которой совпадает с точкой O , а основанием которой является ромб. Он на рис. 2 обозначен пунктиром. При определении системы координат, точку O совместим с точкой начала системы координат. Координатную ось X направим через центр ромба, образованного фотоприемниками $\Phi\Pi_1$, $\Phi\Pi_2$, $\Phi\Pi_4$, $\Phi\Pi_5$. При этом фотоприемник $\Phi\Pi_3$ будет расположен на оси X . Поскольку с помощью данной измерительной системы предполагается изучение кривых сечений поверхности в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, то фотоприемники $\Phi\Pi_1$, $\Phi\Pi_2$ будут

ориентированы на измерения расстояний вдоль направлений, лежащих в координатной плоскости YX и составляющих одинаковые углы φ с координатной осью X . А фотоприемники $\Phi\Pi_4, \Phi\Pi_5$ ориентированы на измерение расстояний вдоль направлений, лежащих в координатной плоскости XZ и также составляющих одинаковые углы φ с координатной осью X . Видим, что при таких условиях конструкция системы позволяет измерять расстояния до точек, которые лежат на сечениях поверхности, образованных двумя взаимно перпендикулярными плоскостями.

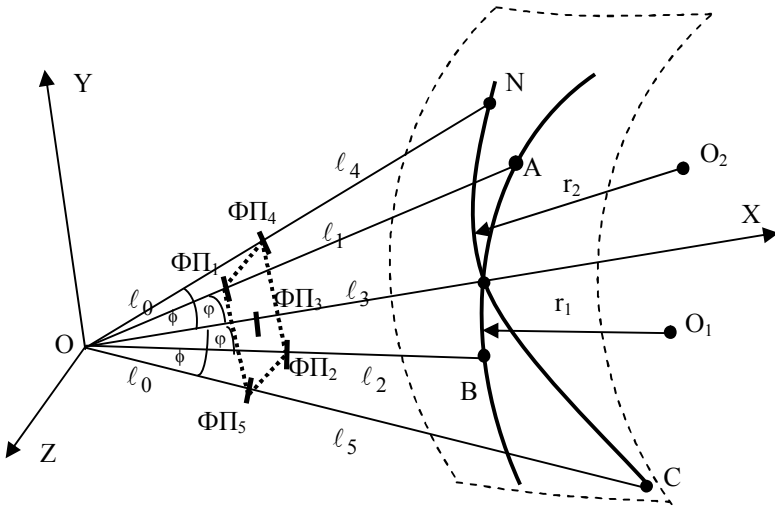


Рис. 2. Схема измерений пятиканального фазового светодальномера

При использовании этой измерительной системы будут получены расстояния $l_1 \div l_5$ от фотоприемников до пяти точек исследуемой поверхности A, B, C, D, N . При этом точка D является общей точкой для обеих плоскостей сечений поверхности.

Определяя расстояния до точек поверхности, запишем их координаты в принятой координатной системе

$$A = ((l_0 + l_1)\cos\varphi, (l_0 + l_1)\sin\varphi, 0); \quad (20)$$

$$B = ((l_0 + l_2)\cos\varphi, -(l_0 + l_2)\sin\varphi, 0); \quad (21)$$

$$D = (l_0 + l_3, 0, 0); \quad (22)$$

$$C = ((l_0 + l_4)\cos\varphi, 0, (l_0 + l_4)\sin\varphi); \quad (23)$$

$$N = ((l_0 + l_5)\cos\varphi, 0, -(l_0 + l_5)\sin\varphi). \quad (24)$$

По координатам точек A, B, C определим радиус кривизны плоской кривой, образованной на поверхности при ее сечении плоскостью XY и

лежащей в этой плоскости. При этом точка центра этой окружности также лежит в этой плоскости. Уравнение окружности записывается в виде

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2, \quad (25)$$

где r_1 – радиус кривизны, а x_1, y_1 – координаты центра окружности O_1 , восстанавливаемой по координатам точек А, В, D. Для определения неизвестных r_1, x_1, y_1 подставим в (25) координаты точек А, В, D. При этом получим систему уравнений, подобную системе уравнений (7) – (10). Решение этой системы проведем аналогично выполненному выше. В результате проведенных вычислений получим координаты точки O_1 и радиус r_1 , которые записываются в виде

$$x_1 = \frac{(2\ell_0 + \ell_1 + \ell_3)(\ell_1 - \ell_3)(\ell_0 + \ell_2) + (2\ell_0 + \ell_2 + \ell_3)(\ell_2 - \ell_3)(\ell_0 + \ell_1)}{2[(\ell_0 + \ell_3)(2\ell_0 + \ell_1 + \ell_2) - 2(\ell_0 + \ell_1)(\ell_0 + \ell_2)\cos\varphi]}; \quad (26)$$

$$y_1 = \frac{(2\ell_0 + \ell_1 + \ell_3)(\ell_3 - \ell_1)((\ell_0 + \ell_2)\cos\varphi - (\ell_0 + \ell_3))}{2\sin\varphi[(\ell_0 + \ell_3)(2\ell_0 + \ell_1 + \ell_2) - 2(\ell_0 + \ell_1)(\ell_0 + \ell_2)\cos\varphi]} +$$

$$+ \frac{(2\ell_0 + \ell_2 + \ell_3)(\ell_2 - \ell_3)((\ell_0 + \ell_1)\cos\varphi - (\ell_0 + \ell_3))}{2\sin\varphi[(\ell_0 + \ell_3)(2\ell_0 + \ell_1 + \ell_2) - 2(\ell_0 + \ell_1)(\ell_0 + \ell_2)\cos\varphi]}; \quad (27)$$

$$r_1 = \sqrt{(\ell_0 + \ell_3 - x_1)^2 + y_1^2}. \quad (28)$$

По координатам другой тройки точек С, D, N поверхности определим параметры кривой, образованной при сечении поверхности координатной плоскостью XZ. При этом для этой кривой, лежащей в плоскости ориентированной перпендикулярно относительно первой кривой, будут иными как радиус кривизны, который обозначим r_2 , так и положение центра окружности, который лежит в плоскости XZ. Положение этого центра и на рис.2 обозначено точкой O_2 . Координаты точки O_2 , которые обозначим x_2, z_2 , будут определены из выражений

$$x_2 = \frac{(2\ell_0 + \ell_3 + \ell_4)(\ell_4 - \ell_3)(\ell_0 + \ell_5) + (2\ell_0 + \ell_3 + \ell_5)(\ell_5 - \ell_3)(\ell_0 + \ell_4)}{2[(\ell_0 + \ell_3)(2\ell_0 + \ell_4 + \ell_5) - 2(\ell_0 + \ell_4)(\ell_0 + \ell_5)\cos\varphi]}; \quad (29)$$

$$z_2 = \frac{(2\ell_0 + \ell_3 + \ell_4)(\ell_3 - \ell_4)((\ell_0 + \ell_5)\cos\varphi - (\ell_0 + \ell_3))}{2\sin\varphi[(\ell_0 + \ell_3)(2\ell_0 + \ell_3 + \ell_4) - 2(\ell_0 + \ell_4)(\ell_0 + \ell_5)\cos\varphi]} +$$

$$+ \frac{(2\ell_0 + \ell_3 + \ell_5)(\ell_5 - \ell_3)((\ell_0 + \ell_4)\cos\varphi - (\ell_0 + \ell_3))}{2\sin\varphi[(\ell_0 + \ell_3)(2\ell_0 + \ell_4 + \ell_5) - 2(\ell_0 + \ell_4)(\ell_0 + \ell_5)\cos\varphi]}; \quad (30)$$

$$r_2 = \sqrt{(\ell_0 + \ell_3 - x_2)^2 + z_2^2}. \quad (31)$$

Если поверхность цилиндрическая, а ось Y параллельна оси цилиндра, то радиус кривизны, определяемый по точкам A, B, C будет стремиться к бесконечности, т.е. $r_1 \rightarrow \infty$. При этом точки A, B, C уже будут лежать на прямой. Уравнение этой прямой, которая лежит в плоскости XY , построим используя координаты точек A и B . Оно имеет вид

$$y = ((\ell_0 + \ell_1) \cos \varphi - x) \frac{(2\ell_0 + \ell_1 + \ell_2)}{(\ell_2 - \ell_1)} \operatorname{tg} \varphi + (\ell_0 + \ell_1) \sin \varphi. \quad (32)$$

Соответственно точка D также будет лежать на этой прямой, и ее координаты будут удовлетворять уравнению (32).

Когда плоскость XY параллельна оси цилиндра, а плоскость XZ – перпендикулярна, то радиус кривизны сечения, получаемый с использованием координат точек C, D, N , будет равен радиусу цилиндра.

Таким образом, видим, что с помощью измерительной системы с пятью фазовыми светодальномерами представляется возможным определять радиусы кривизны кривых сечений поверхности двумя взаимно перпендикулярными плоскостями. С помощью такой системы можно определять радиус цилиндрической поверхности. Однако при определении радиуса цилиндрической поверхности возникает проблема ориентации собственных осей измерительной системы согласованно с ориентацией самого цилиндра и выполнении условия параллельности оси цилиндра и координатной оси Y . Плоскость XY должна быть параллельной оси цилиндра, а ось X должна быть перпендикулярной оси цилиндра. Удовлетворить этим условиям весьма трудно. Из них следует, что должно выполняться равенство расстояний отрезков между точками A, D и D, B , т.е. $|AD| = |DB|$. Однако экспериментально, с учетом ошибок измерений удовлетворить этому равенству сложно даже при идеальной цилиндрической поверхности и хорошо подобранной ориентации измерительной системы. Поэтому необходимо добиваться минимального значения для квадрата разности расстояний

$$\delta = \{|AD| - |DB|\}^2.$$

Величина разности δ с учетом определения координат точек, в соответствии с выражениями (20) – (22), имеет вид

$$\delta = \left\{ \sqrt{[\ell_0 + \ell_3 - (\ell_0 + \ell_1) \cos \varphi]^2 + [(\ell_0 + \ell_1) \sin \varphi]^2} - \sqrt{[\ell_0 + \ell_3 - (\ell_0 + \ell_2) \cos \varphi]^2 + [(\ell_0 + \ell_2) \sin \varphi]^2} \right\}^2. \quad (33)$$

Понятно, что выражение (33) является одним из условий для проверки согласованности ориентации цилиндрической поверхности и из-

мерительной системы при определении радиуса кривизны цилиндрической поверхности.

Заключение. Из результатов проведенных исследований следует, что с помощью четырех- и пятиканальных измерительных систем на основе фазовых светодальномеров, возможно определение геометрических характеристик сферических и цилиндрических поверхностей крупногабаритных объектов. Это означает, что увеличение числа измерительных каналов расширяет возможности метода при исследовании более сложных поверхностей, что значительно расширяет информативность применяемого метода фазовой светодальнометрии.

Определение геометрических характеристик крупногабаритных объектов сферической и цилиндрической формы важно при решении задач восстановления их формы, т.е. математического определения уравнения поверхности. С другой стороны возможности метода позволяют определять характеристики крупномасштабных дефектов формы крупногабаритных объектов. Это в значительной степени расширяет возможности измерительных систем при диагностике состояния таких изделий.

Также подчеркнем, что предлагаемый метод не требует определения ориентации поверхности в пространстве. Это указывает на возможность создания мобильных измерительных систем, которые возможно эксплуатировать в производственных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бабак В.П., Шмаров В.Н. Вплив геометричного фактора на відновлення поверхні великогабаритних виробів з використанням світлодалекомірів // Вісник НАУ. – 2004. – № 1. – С. 60 – 67.*
2. *Бабак В.П., Шмаров В.Н., Калита В.М. Восстановление формы поверхностей крупногабаритных объектов лазерными светодальномерами // Технологические системы. – 2004. – № 3.*
3. *Бабак В.П., Шмаров В.М., Калита В.М. Дослідження геометричних особливостей поверхонь великогабаритних об'єктів трьохканальною вимірювальною системою з фазовими світлодалекомірами // Вісник НАУ. – 2004. – № 2. – С. 36 – 42.*

Поступила 6.04.2005

Рецензент: доктор технических наук, профессор В.И. Карпенко,
Харьковский университет Воздушных Сил.
