

**ФОТОПРОЕКЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ  
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ**

© 2016 Б.В. Скворцов, А.В. Черных, А.Н. Малышева-Стройкова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П.Королёва

Статья поступила в редакцию 16.12.2016

Предложен новый, способ измерения геометрических параметров деталей сложной формы. Разработана математическая модель фотопроекционного метода. Показана связь между искажениями проецируемой системы координат и 3D профилем измеряемого объекта, относительно неподвижного пятна засвета лазерного дальномера. Выведены аналитические зависимости реализации устройства. Описана методика формирования цифрового образа ("облака" точек) пространственного объекта, по его единственному изображению в лучах проектора внешней системы координат. Определено направление дальнейших исследований.

*Ключевые слова:* дистанционное измерение; проектор периодического узора; фотоприёмник; лазерный дальномер.

**ВВЕДЕНИЕ**

С развитием промышленности, сложилась ситуация, когда время, затрачиваемое на изготовление изделий сложной формы значительно меньше, чем время необходимое для контроля их геометрических параметров. В авиационной промышленности точное соответствие детали заданным размерам, исключительно важно, поскольку напрямую влияет на работоспособность и надёжность механизмов. Таким образом, разработка быстродействующего высокоточного метода измерения объектов сложной формы является важной задачей связанной с безопасностью эксплуатации летательных аппаратов. В работе предлагается новый метод фотопроекционного измерения профильных объектов.

**АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ  
СПОСОБОВ ИЗМЕРЕНИЯ**

Общепринятые методы измерений сходятся к двум видам: контактные и бесконтактные. Контактный метод – это шаблонные приборы и координатно-измерительные машины. Метод является классическим, позволяет проводить измерения с необходимой точностью  $\approx 1 \dots 9 \times 10^{-6}$  м, но имеет серьёзные недостатки: крайне низкое быстродействие; большие габариты прибора относительно размера измеряемой детали;

стационарное размещение; непосредственный физический контакт щупа (или шаблона) с деталью; высокая стоимость прибора и большие эксплуатационные затраты [1].

Бесконтактные методы - это системы лазерного сканирования. В целом, они лишены недостатков контактных измерителей и получили более широкое распространение. Последние разработки показывают точность измерений не хуже, чем у контактных измерителей [2], однако, несмотря на высокую скорость измерения одной, отдельно взятой точки, общее быстродействие лазерных сканеров недостаточно. В случае, когда деталь имеет большие размеры, и/или множество линий сопряжения, создающих разрывы функций математической модели, сохранение заданной точности требует десятки миллионов измерений. Второй, существенный недостаток лазерных измерителей – это наличие устройства отклонения лазерного луча, обеспечивающее сканирование поверхности. Такие системы всегда имеют механические элементы, а значит подвержены износу в процессе эксплуатации, и со временем, существенно ухудшают качество измерительного устройства. Ещё одним недостатком являются жесткие требования к «правильному» отражению луча поверхностью измеряемой детали. Зачастую лазерные дальномеры не могут измерить дистанцию до объекта из-за особенностей отражающих свойств поверхности или «неудобного» угла отражения.

В статье, предлагается метод измерения, лишенный недостатков сканирующих лазерных систем: не использующий движущихся механических элементов; не требующий направленного в сторону фотоприёмника концентрированного потока отраженного света; считывающий информацию о поверхности измеряемого объекта сразу со всей площади, за один цикл измерения.

*Скворцов Борис Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника», главный научный сотрудник. E-mail: aps@ssau.ru*

*Черных Андрей Валериевич, аспирант.*

*E-mail: ccbs.world@gmail.com*

*Малышева-Стройкова Александра Николаевна, кандидат технических наук, младший научный сотрудник.*

## ФОТОПРОЕКЦИОННЫЙ МЕТОД

Сущность фотопроекционного метода измерения 3-D объекта иллюстрируется рис. 1.

Измерительная процедура состоит в том, что объект 5 подсвечивается проектором периодического узора 1. Причём функциональные зависимости изменения узора по координатам  $X$  и  $Y$  известны. Расстояние до одной, произвольно выбранной, точки измеряется лазерным дальномером 3, причём пятно отражения лазерного луча принимается за начало координат, относительно которых происходит построение облака точек математической модели. Изображение объекта с наложенной на неё проекцией периодического узора и световым пятном лазерного дальномера фиксируется фотокамерой 2.

В качестве исходных, примем следующие термины и допущения:

- абсолютной точкой отсчёта измерительной системы является точка выхода лазерного луча из оптической системы лазерного дальномера;
- точкой отсчёта проектора является точка фокуса оптической системы проецирования;
- точкой отсчёта фоторегистратора является точка пересечения фокальной оси оптической системы с плоскостью фотоматрицы;
- фокальные плоскости системы проецирования и фотофиксации совпадают;
- луч лазерного дальномера перпендикулярен фокальным плоскостям проектора и регистратора;
- точки входа-выхода оптических систем дальномера, проектора и фотокамеры находятся в одной плоскости, перпендикулярной лучу лазерного дальномера;
- оптические системы проектора и регистратора «тонкие»;
- свет распространяется прямолинейно;

- расстояние до объекта измеряется по координате  $Z$ .

Подобные разработки ведутся и за рубежом, но в них используется освещение объекта параллельными лучами света, без фиксации опорной точки лучом лазерного дальномера [3].

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В общем случае, с учётом принятых допущений, задача бесконтактного, дистанционного измерения профильных объектов сводится к задаче получения множества точек на поверхности объекта, до которых известно расстояние от абсолютной точки отсчёта и углы отклонений луча дальномера от оси  $Z$ , рис. 2.

Предположим, мы измерили  $n$  контрольных точек  $P_i$  на объекте, образующих массив  $\{P_1, \dots, P_n\}$ , где  $i = 0 \dots n$ . Для произвольной  $P_i$  - ой точки можно записать

$$\begin{cases} X_i = D_i \sin \alpha \\ Y_i = D_i \cos \alpha \sin \beta \\ Z_i = D_i \cos \alpha \cos \beta \end{cases} \quad (1)$$

Таким способом формируется цифровой образ профильного объекта и если точек достаточно много произвольный, линейный размер на объекте, например между точками  $P_i$  и  $P_n$  определяется по формуле

$$M_{P_i P_n} = \sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2 + (Z_{i+1} - Z_i)^2}$$

или

$$M_{P_i P_n} = \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2 + \Delta Z_i^2} \quad (2)$$

Любой криволинейный размер, взятый на контролируемой поверхности получится путём

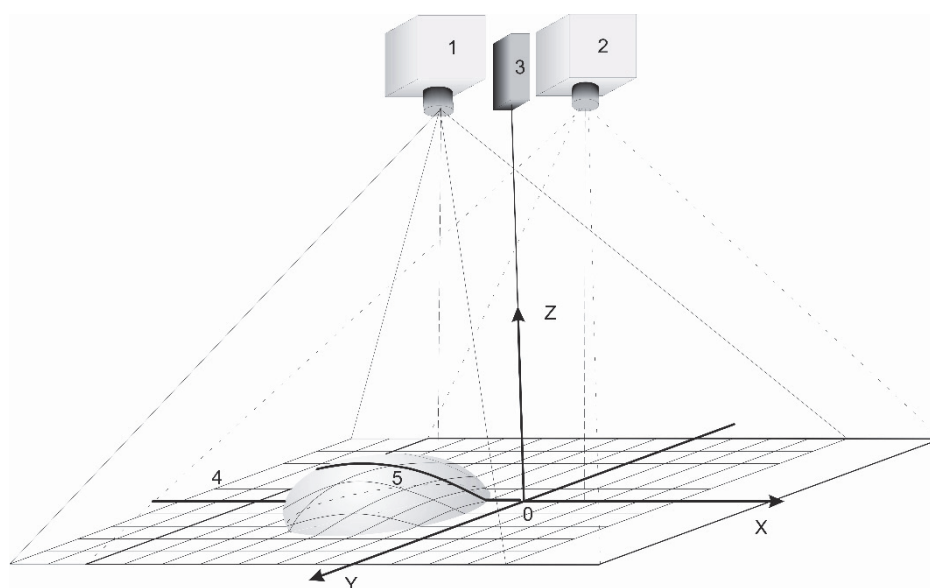
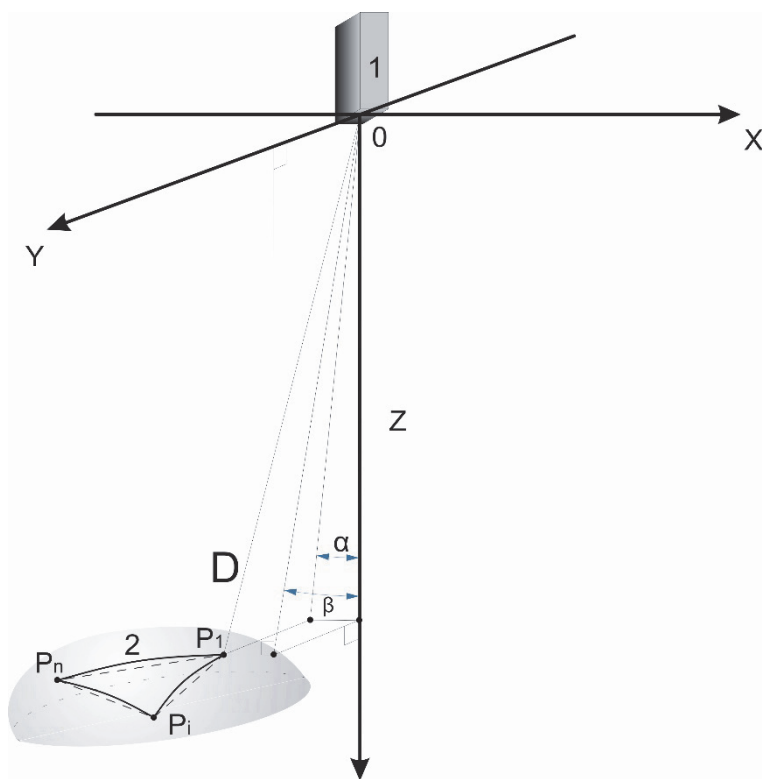


Рис. 1. Структурная схема устройства скоростного измерения формы:  
1 – проектор; 2 – фотокамера; 3 – лазерный дальномер;  
4 – проецируемая система координат;



**Рис. 2.** Принцип лазерного сканирования:  
1 – лазерный дальномер; 2 – сканируемый объект

последовательного суммирования составляющих его отрезков, при условии пренебрежительно малого расстояния между точками сканирования. Таким образом, для формирования точного цифрового образа объекта необходимо множество точек, что трудоёмко и требует прецизионной системы отклонения луча дальномера. В настоящее время существуют быстродействующие системы измерения профильных объектов [4], но они измеряют объекты простой формы (фигуры вращения) используя небольшое количество реперных точек. Отличие предлагаемого метода измерения профильных объектов заключается в том, что он позволяет получить множество точек цифрового образа исследуемой детали за один цикл измерения и не использует механических систем отклонения лазерного луча.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЕКТОРА

Рассмотрим систему проецирования, состоящую из проектора, лазерного дальномера и идеально плоского экрана. Предположим, что:

- фокальная плоскость системы проецирования и плоскость экрана параллельны;
- луч лазерного дальномера перпендикулярен плоскости экрана;
- плоскость экрана и плоскость XY расчётной системы координат совпадают;
- узор проецируется расходящимся световым потоком;
- свет распространяется прямолинейно.

На рис. 3, показана геометрическая модель такого проектора (плоскость XY перпендикулярна плоскости рисунка).

В качестве начала координат выберем точку S (лежащую на оси X), расстояние до которой известно из показаний лазерного дальномера. В этом случае координаты точек  $x$  и  $x'$ , так же лежащих на X и принадлежащих линии терминатора<sup>1</sup> проецируемого периодического рисунка можно рассчитать по формулам:

$$x = \frac{(f + D)\left(\frac{1}{2}\sigma + k_x(\rho + \sigma)\right)}{f} - L; \quad (3)$$

$$x' = \frac{(f + D)\left(\frac{1}{2}\sigma + \rho + k_x(\rho + \sigma)\right)}{f} - L, \quad (4)$$

где  $\rho$  – полоса затемнения, а  $\sigma$  – полоса пропускания периодического узора. Коэффициент  $k_x$  – порядковый номер полосы затемнения, считаемый от оптической оси проектора в сторону лазерного дальномера,  $D$  – расстояние от фокальной плоскости проектора до плоскости экрана,  $f$  – фокусное расстояние объектива проектора.

Поскольку узор периодический, то расчёт координаты Y будет выглядеть аналогично, за исключением учёта смещения точки отсчёта по оси X.

<sup>1</sup> В астрономии: Терминатор (от лат. terminare – прекращать) – линия светораздела, отделяющая освещённую (светлую) часть небесного тела от неосвещённой (тёмной) части

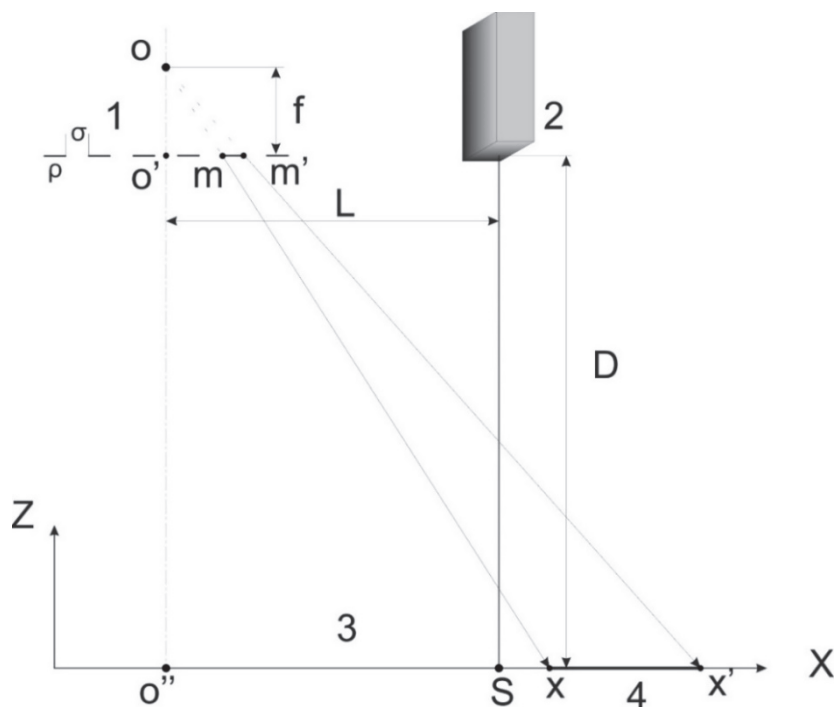


Рис. 3. Геометрическая модель системы проецирования:

1 – проектор периодического узора; 2 – лазерный дальномер; 3 – плоский экран; 4 – область затенения

$$y = \frac{(f + D)(\frac{1}{2}\sigma + k_y(\rho + \sigma))}{f}; \quad (5)$$

$$y' = \frac{(f + D)(\frac{1}{2}\sigma + \rho + k_y(\rho + \sigma))}{f}. \quad (6)$$

Таким образом, мы всегда можем рассчитать геометрическое место произвольной точки проекции линий терминатора на идеально плоский экран, зная расстояние  $D$ . Это позволяет сформулировать аналитическую зависимость абсолютной системы координат  $(X; Y)$ , как функцию расстояния до экрана  $D$  и шага  $\sigma, \rho$  системы координат проектора

$$X = F(D; \sigma; \rho);$$

$$Y = F(D; \sigma; \rho).$$

где  $\sigma, \rho$  – единичные элементы осей координат  $(m; n)$  периодического узора.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОТОРЕГИСТРАТОРА

Рис. 4, демонстрирует геометрическую модель фотографического измерителя. В качестве начальных условий принимаем что:

- фокальная плоскость системы фоторегистратора, фотоматрица и плоскость экрана параллельны;
- луч лазерного дальномера перпендикулярен плоскости экрана;
- ось  $m$ , системы координат проектора на-

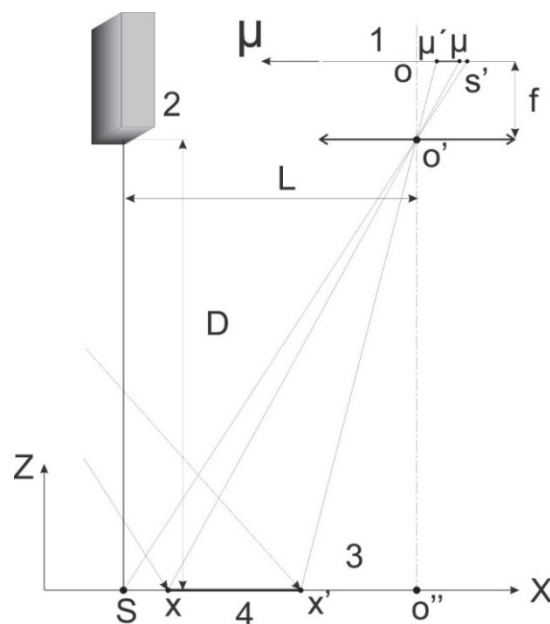


Рис. 4. Геометрическая модель фотографического измерителя

1 – фоторегистратор; 2 – лазерный дальномер; 3 – плоский экран; 4 – область затенения

ходится на одной линии с осью  $\mu$ , системы координат фотоматрицы;

- ось  $n$ , системы координат проектора параллельна оси  $\eta$ , системы координат фотоматрицы;
- свет распространяется прямолинейно.

В этом случае координаты точек  $\mu$  и  $\mu'$ , принадлежащих отображению линий терминатора и соответствующих точкам  $x$  и  $x'$ , на плоскости  $XU$ , можно рассчитать по формулам:

$$\mu = -\frac{f}{D}(L - x);$$

$$\mu' = -\frac{f}{D}(L - x'),$$

где точки  $\mu$  и  $\mu'$  на плоскости  $(\mu; \eta)$ , соответствуют точкам  $x$  и  $x'$  на плоскости  $(X; Y)$ . Подставив в выражения (5), (6) аналитические значения (1) и (2), выведенные для точек  $x$  и  $x'$ , получим

$$\mu = -\frac{f}{D} \left( L - \left( \frac{(f + D) \left( \frac{1}{2} \sigma + k_x(\rho + \sigma) \right)}{f} - L \right) \right) =$$

$$= -\frac{f}{D} \left( 2L - \frac{(f + D) \left( \frac{1}{2} \sigma + k_x(\rho + \sigma) \right)}{f} \right) =$$

$$= \frac{(f + D) \left( \frac{1}{2} \sigma + k_x(\rho + \sigma) \right) - 2fL}{D}. \quad (7)$$

Аналогично

$$\mu' = \frac{(f + D) \left( \frac{1}{2} \sigma + \rho + k_x(\rho + \sigma) \right) - 2fL}{D}. \quad (8)$$

Поскольку направления осей  $n, Y, \eta$  совпадают, то подобные выражения для оси  $Y$  будут выглядеть следующим образом:

$$\eta = \frac{fy}{D}, \quad (9)$$

$$\eta' = \frac{fy'}{D}. \quad (10)$$

Подставив в (9), (10) выражения (3), (4) получим

$$\eta = \frac{f}{D} \frac{(f + D) \left( \frac{1}{2} \sigma + k_y(\rho + \sigma) \right)}{f};$$

$$\eta = \frac{(f + D) \left( \frac{1}{2} \sigma + k_y(\rho + \sigma) \right)}{D}; \quad (11)$$

$$\eta' = \frac{f}{D} \frac{(f + D) \left( \frac{1}{2} \sigma + \rho + k_y(\rho + \sigma) \right)}{f};$$

$$\eta' = \frac{(f + D) \left( \frac{1}{2} \sigma + \rho + k_y(\rho + \sigma) \right)}{D}. \quad (12)$$

Таким образом, известная функция распределения линий периодического узора проектора  $F(m;n)$ , преобразуется в рассчитываемую функцию линий периодического узора на идеально плоском экране  $F(X;Y)$  и далее, преобразуется

в измеряемую координату нахождения соответствующих линий периодического узора на фотоэлементе регистратора  $F(\mu;\eta)$ .

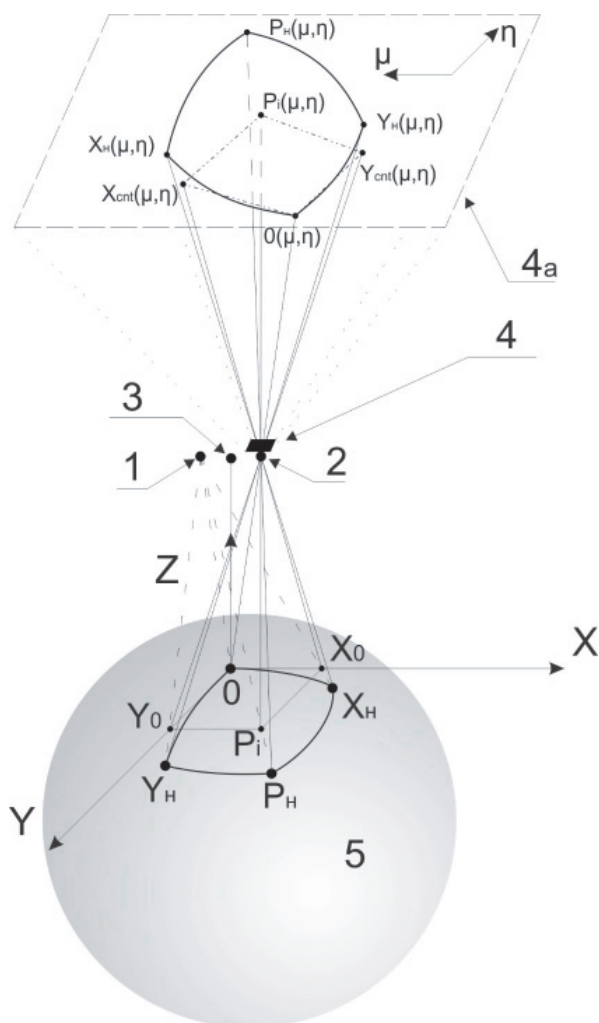
В качестве общей, для всех трёх систем координат, точки отсчёта, выбираем точку  $S$  (рис. 2, 3). Расстояния между оптической осью проектора, центром светового пучка лазерного дальномера и оптической осью фоторегистратора считаем известными и равными  $L$ , фокусные расстояния объективов проектора и регистратора, равными  $f$ . Тогда точка начала отсчёта на фотоматрице  $s'$ , соответствующая точке  $S$ , началу координат в плоскости  $(X; Y)$ , будет равна

$$s'_x = -\frac{Lf}{D}; s'_y = 0. \quad (13)$$

Таким образом, существование аналитической связи между функцией  $F(m;n)$  заданной нами; функцией  $F(X;Y)$ , зависящей от расстояния до экрана  $Z$ ; и функцией  $F(\mu;\eta)$ , значения которой считаются с матрицы фоторегистратора, считаем доказанным. Очевидно, что при отклонении формы экрана от идеальной, будет наблюдаться смещение наблюдаемых линий от их расчётных положений. Поскольку, с практической точки зрения, любой предмет можно рассматривать, как неидеально плоский экран то зафиксировав смещение линий проецируемого узора, относительно их расчётных значений, мы получим значения  $\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i$ , для любой точки, находящейся на линии терминатора, а, значит, и информацию о форме исследуемого объекта. Не вызывает сомнений, что количество точек измерения будет равным количеству пикселей фотоматрицы, находящихся на линиях терминаторов проецируемого узора, а значит максимально возможным.

### ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ТРЁХМЕРНОГО ОБЪЕКТА

На рис. 5, показана структурная схема фотографического измерителя объёмной детали. Как было видно из формулы (2), для вычисления размеров объекта, относительно выбранной точки отсчёта, необходимо знать решение системы уравнений (1), относительно произвольно выбранной точки поверхности. Ранее было принято, что абсолютная ось координат  $X$  параллельна координате проектора  $m$  и совпадает с осью координат фоторегистратора  $\mu$ . Абсолютная ось координат  $Y$  параллельна координате проектора  $n$  и оси координат фоторегистратора  $\eta$ , которые, так же параллельны друг другу. Координаты точек пересечения лучей проектора с вообразимой плоскостью  $(X_0; Y_0)$ , находящейся на расстоянии  $D_0$ , образуют линии терминатора. Любая расчётная точка  $P_i$ , расположенная на этих линиях имеет координаты  $X_0; Y_0; Z_0$ . Эта же точка проецируется на реальный объект с наблюдаемыми координатами  $X_n; Y_n; Z_n$  (индекс  $n$  – означает наблюдаемая)



**Рис. 5.** Геометрическая модель фотопроеционного измерителя:  
 1 – проектор периодического узора;  
 2 – зрачок оптической системы фоторегистратора;  
 3 – лазерный дальномер;  
 4, 4а – фотоматрица и её увеличенная проекция;  
 5 – трёхмерный объект

и отображается на плоскость фотоматрицы в  $X_H(\mu; \eta); Y_H(\mu; \eta)$ .

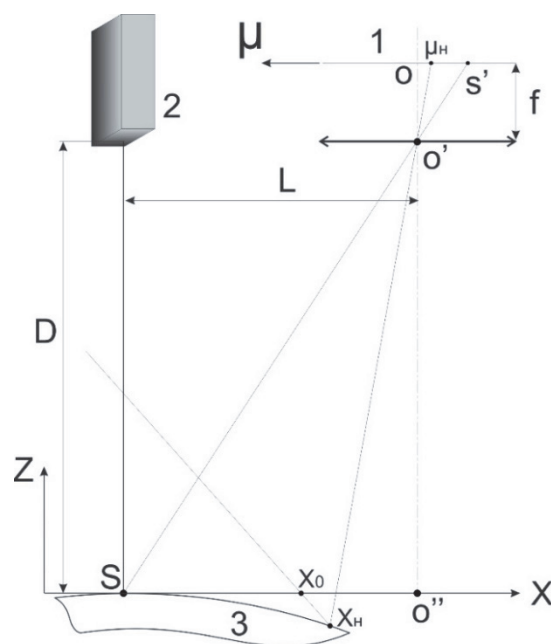
Запишем систему уравнений для определения положения наблюдаемых точек, образующей реальную линию терминатора, на объекте, относительно воображаемой линии терминатора, которая находится на воображаемой плоскости ( $X_0; Y_0$ )

$$\begin{cases} \Delta X = X_0 - X_H \\ \Delta Y = Y_0 - Y_H \\ \Delta Z = Z_0 - Z_H \end{cases} \quad (14)$$

Со стороны проектора, координата любой точки  $X_0$ , проецируемой линии терминатора выводится из формулы (3) и равна

$$X_0 = \frac{(f + D_0)(\frac{1}{2}\sigma + k_x(\rho + \sigma))}{f} - L.$$

Со стороны фоторегистратора, рис. 6, положение видимой точки  $X_H$  рассчитывается по формуле



**Рис. 6.** Геометрическая модель фотографического измерителя объекта:  
 1 – фоторегистратор; 2 – лазерный дальномер;  
 3 – объёмная деталь

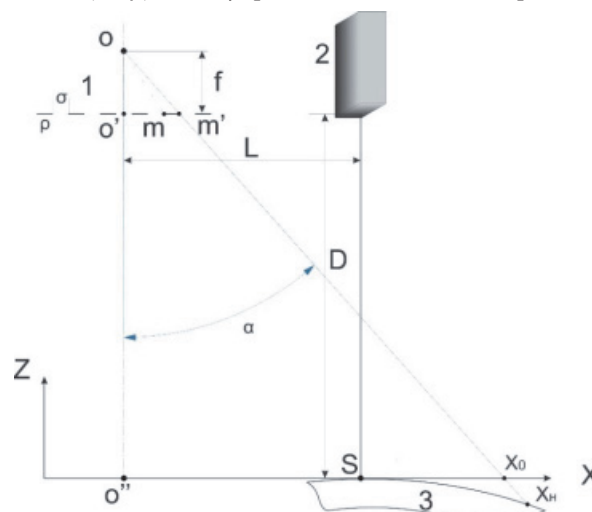
$$X_H = -\frac{\mu_H D_H}{f} + L.$$

Поскольку со стороны проектора рис.7,

$$\tan \alpha = \frac{\frac{1}{2}\sigma + k_x(\rho + \sigma)}{f} = \frac{X_0}{D_0 + f} = \frac{X_H}{D_H + f};$$

$$X_H = \frac{(D_H + f)(\frac{1}{2}\sigma + k_x(\rho + \sigma))}{f},$$

что позволяет записать  $D_H$ , выраженное через параметры проектора внешней системы координат ( $\sigma; \rho$ ), и внутренней системы координат



**Рис. 7.** Геометрическая модель системы проецирования внешних координат:  
 1 – проектор периодического узора;  
 2 – лазерный дальномер; 3 – объект

фотоматрицы регистратора ( $\mu; \eta$ )

$$\frac{(D_H + f)\left(\frac{1}{2}\sigma + k_x(\rho + \sigma)\right)}{f} = -\frac{\mu_H D_H}{f} + L;$$

$$(D_H + f)\left(\frac{1}{2}\sigma + k_x(\rho + \sigma)\right) = -\mu_H D_H + fL.$$

Заменим на  $m$  выражение  $\frac{1}{2}\sigma + k_x(\rho + \sigma)$ , тогда

$$D_H m + f m = -\mu_H D_H + fL;$$

$$D_H m + \mu_H D_H = fL - f m;$$

$$D_H = \frac{f(L - m)}{\mu_H + m}, \text{ где } m = \frac{1}{2}\sigma + k_x(\rho + \sigma).$$

Для оси  $Y$

$$Y_0 = \frac{(f + D_0)\left(\frac{1}{2}\sigma + k_y(\rho + \sigma)\right)}{f};$$

$$Y_H = -\frac{\eta_H D_H}{f};$$

$$\tan \beta = \frac{\frac{1}{2}\sigma + k_y(\rho + \sigma)}{f} = \frac{Y_0}{D_0 + f} = \frac{Y_H}{D_H + f};$$

$$Y_H = \frac{(D_H + f)\left(\frac{1}{2}\sigma + k_y(\rho + \sigma)\right)}{f};$$

$$\frac{(D_H + f)\left(\frac{1}{2}\sigma + k_y(\rho + \sigma)\right)}{f} = -\frac{\eta_H D_H}{f}.$$

Заменим на  $n$  выражение  $\frac{1}{2}\sigma + k_y(\rho + \sigma)$ , тогда

$$(D_H + f)n = -\eta_H D_H;$$

$$D_H = -\frac{f n}{\eta_H + n}, \text{ где } n = \frac{1}{2}\sigma + k_y(\rho + \sigma).$$

Для оси  $Z$

$$Z_0 = D;$$

$$Z_H = D_H = \frac{f(L - m)}{\mu_H + m} = \frac{f n}{\eta_H + n}.$$

Тогда система уравнений (14) может быть записана

$$\begin{cases} \Delta X = \frac{(f + Z_0)\left(\frac{1}{2}\sigma + k_x(\rho + \sigma)\right)}{f} + \frac{\mu_H\left(L - \frac{1}{2}\sigma - k_x(\rho + \sigma)\right)}{\mu_H + \frac{1}{2}\sigma + k_x(\rho + \sigma)} - 2L \\ \Delta Y = \frac{(f + Z_0)\left(\frac{1}{2}\sigma + k_y(\rho + \sigma)\right)}{f} + \frac{\eta_H\left(\frac{1}{2}\sigma + k_y(\rho + \sigma)\right)}{\eta_H + \frac{1}{2}\sigma + k_y(\rho + \sigma)} \\ \Delta Z = D_0 - \frac{f\left(L - \frac{1}{2}\sigma - k_x(\rho + \sigma)\right)}{\mu_H + \frac{1}{2}\sigma + k_x(\rho + \sigma)} = \frac{f\left(\frac{1}{2}\sigma + k_y(\rho + \sigma)\right)}{\eta_H + \frac{1}{2}\sigma + k_y(\rho + \sigma)} \end{cases}$$

## ВЫВОДЫ

Предложенный, фотопроеционный метод измерения геометрических параметров деталей сложной формы существенно сокращает время контроля изделия, поскольку не требует сканирования поверхности и позволяет определить сколь угодно большое множество точек поверхности, находящихся на распознаваемых элементах проецируемой системы координат, таких как линии терминатора или срединные линии проецируемых тёмных (светлых) полос. Метод не требует системы отклонения лазерного луча и менее требователен к углам и коэффициенту отражения материала детали, поскольку в качестве информационного сигнала использует, как освещённую область проецируемого узора, так и его затенённую часть. Таким образом, учитывая существующие возможности обработки изображений, можно утверждать, что общее время измерения формы детали будет равно времени получения единственной фотографии объекта с каждого из необходимых ракурсов. Это позволит повысить скорость контроля деталей, до скорости их производства, выбраковывать все изделия, не соответствующие заданным размерам, а значит увеличить надёжность выпускаемых машин и механизмов, при сокращении стоимости производства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Координатно-измерительные машины и комплексы / А.И. Першев, С.И. Феоктистов, Д.Г. Колыханов, В.И. Шпорт // Наука и технологии в промышленности. 2011. №3. С. 36 – 48.
2. Скворцов Б.В., Жиганов И.Ю., Малышева-Стройкова А.Н. Методы дистанционных измерений геометрических параметров объектов М.: Ламберт, 2012. 320 с
3. On axis fringe projection: A new method for shape measurement. Optics and Lasers in Engineering, Volume 69, June 2015, Pages 29-34. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816615000044> (дата обращения 12.11.2016).
4. Скворцов Б.В., Малышева-Стройкова А.Н., Черных А.В. Метод лазерно-телевизионного контроля геометрических параметров объектов сложной конфигурации // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 1. С. 71-77.

## **PHOTOPROTECTION METHOD OF MEASURING THREE DIMENSIONAL OBJECTS**

© 2016 B.V. Skvortsov, A.V. Chernykh, A.N. Malysheva-Stroykova

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

We propose a new technique of measuring geometric parameters of a complex-shaped item, significant for both aerospace and heavy engineering industry. The mathematical model of photoprotection measuring method is developed. The research shows the relationship between deformation of the projected coordinate system on the photographic image and 3D shape of an item. Measurements are considered relative to a fixed mark of laser rangefinder. The method of object digital image (the “cloud” of points) creation is described by using only rays of the projector external coordinate system on the flat digital image of a photo matrix.  
*Keywords:* distance measurement; projector of the periodic pattern; photo camera; laser rangefinder

---

*Boris Skvortsov, Doctor of Technics, Professor, Chief Research Fellow. E-mail: [aps@ssau.ru](mailto:aps@ssau.ru)  
Andrey Chernykh, Post-Graduate Student.  
E-mail: [ccbs.world@gmail.com](mailto:ccbs.world@gmail.com)  
Aleksandra Malysheva-Stroykova, Candidate of Technics, Associate Research Fellow.*