

*Четырнадцатая Международная научно-техническая конференция  
«Оптические методы исследования потоков»  
Москва, 26 – 30 июня 2017 г.*

УДК 621.039

Е.П. Доморацкий<sup>1,2</sup>, Т.Н. Байбикова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ),  
Россия,*

*101000, Москва, Мясницкая ул., 20, E-mail: Domorackiy.E@mfua.ru; tbaibicova@hse.ru*

<sup>2</sup> *Московский финансово-юридический университет МФЮА, Россия,  
115191, Москва, Серпуховской вал., 17 корп. 1, E-mail: Domorackiy.E@mfua.ru;  
tbaibicova@hse.ru*

**ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КОНТРОЛЯ РАЗМЕРОВ И  
ФОРМЫ ДВИЖУЩИХСЯ МИКРООБЪЕКТОВ С РЕКОНСТРУКЦИЕЙ ПО ИХ  
ИМПУЛЬСНЫМ ПРОЕКЦИОННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ**

**АННОТАЦИЯ**

Предложен лазерный быстродействующий метод геометрического оптико-электронного дифференциального контроля потока трехмерных микрообъектов (МО), основанный на статистической динамической малоракурсной реконструкции размеров и формы каждого МО по базовым признакам одной триады его импульсных дискретных двумерных проекционных изображений. В качестве базовых признаков выбраны площади трех взаимноортогональных двумерных проекционных изображений МО и линейные размеры трех его одномерных проекционных изображений на взаимноортогональные оси координат (ракурсы).

Импульсные изображений с движущихся (летающих) МО формируются путем их засветки в параллельных лучах от импульсных лазерных источников оптического излучения и одновременной их синхронной регистрации с помощью оптико-электронных позиционно-чувствительных видеодетекторов с памятью, работающих в режиме раздельной записи и считывания изображений.

При этом пространственными геометрическими характеристиками при описании размеров каждого МО являются линейные (габаритные) размеры и средний проектированный диаметр ( $D$ ) трехмерного изображения аппроксимирующего его эллипсоида общего вида, а при описании формы МО — коэффициент формы ( $K$ ), определяемый отношением максимального и минимального габаритных размеров (осей) аппроксимирующего эллипсоида.

Быстродействие данного метода контроля — не менее 100 МО/с. При этом относительная погрешность контроля диаметра МО не превысила 0,25 % (при достоверности  $PD = 0,7$  и  $K = 1,3$  отн.ед.), а относительные погрешности контроля коэффициента формы МО лежат в диапазоне от 2,3 % (при  $PK = 0,7$  и  $K = 1,3$  отн.ед.) до 0,6% (при  $PK = 0,96$  и  $K = 1,05$  отн.ед.).

**МИКРООБЪЕКТ, МЕТОД КОНТРОЛЯ, СПОСОБ РЕКОНСТРУКЦИИ,  
ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПРОЕКЦИОННОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ,  
БАЗОВЫЕ ПРИЗНАКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ**

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время различные области науки и техники связаны с массовым производством и применением микрообъектов (МО) различной физической природы и агрегатного состояния с размерами от нескольких микрометров до десятков миллиметров, имеющих в общем случае неправильную форму. К таким МО относятся, например, гранулы порошков и алмазов, разнообразные шарики, гранулированные медпрепараты и продукты питания, элементы ядерного и термоядерного топлива, капли органических и неорганических жидкостей, частицы аэрозолей и т.д. К основным характеристикам, определяющим физические и потребительские свойства МО, а также изделий, материалов и веществ на их основе, относятся геометрические характеристики. Поэтому геометрический контроль размеров и формы потока МО является важным и актуальным и должен обеспечивать одновременно автоматический быстродействующий бесконтактный динамический дифференциальный объемный (трехмерный) прецизионный и достоверный контроль разнообразных МО в реальном масштабе времени.

В данной работе предложен соответствующий лазерный метод контроля потока МО, основанный на статистической динамической малоракурсной реконструкции размеров и формы МО по их импульсным дискретным проекционным изображениям.

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МЕТОДА КОНТРОЛЯ

В общем виде контролируемый геометрический параметр (КП) трехмерного объекта характеризуется целевой функцией (1) с набором признаков изображений, необходимых и достаточных для его адекватного (с заданными точностью, достоверностью и быстродействием) описания [1]:

$$КП = f(C_n, P_u, B_\beta, C_o, P_u, K_u, C_p, T), \quad (1)$$

где  $C_n$  — способ получения изображения;  $P_u$  — параметры изображения;  $B_\beta$  — базовые элементы (признаки) изображения;  $C_o$  — способ определения базовых элементов изображения;  $P_u$  — ракурс изображения (проекции) относительно объекта (углы Эйлера  $\alpha, \beta, \gamma$ );  $K_u$  — количество изображений (проекций);  $C_p$  — способ реконструкции (восстановления) образа объекта по признакам изображений;  $T$  — общее время (длительность) контроля КП определяется суммой  $T = t_u + t_o + t_p$ , где  $t_u$  — время получения изображений;  $t_o$  — время обработки изображений;  $t_p$  — время реконструкции.

В соответствии с (1) разработка метода проекционного реконструктивного контроля МО предполагает решение следующих взаимосвязанных задач (операций) [1]:

- выбор пространственных геометрических характеристик для определения размеров и формы МО;
- выбор и определение оптимального вида и представительного числа (количества) проекционных изображений МО;
- определение и выбор оптимальной пространственной ориентировки (ракурсов) проекционных изображений МО;
- разработка способа получения импульсных проекционных изображений МО;
- выбор и определение числовых значений оптимальных базовых геометрических признаков каждого проекционного изображения МО;
- разработка способа реконструкции (математических моделей) размеров и формы трехмерного МО на основе числовых значений выбранных базовых признаков его проекционных изображений.

В предлагаемом методе в качестве оптимальных пространственных характеристик для описания размеров МО выбраны его габаритные размеры и средний проектируемый

диаметр, а для описания формы МО — коэффициент формы, определяемый отношением максимального габаритного размера МО к минимальному.

Выбор оптимального вида, количества и ракурсов проекционных изображений МО, а также их базовых признаков определяется исходя из оптимального (лучшего) сочетания характеристик точности, достоверности и быстродействия метода контроля и основан на численном сравнительном анализе их информативности с помощью имитационного статистического моделирования методом максимальной энтропии [2]. В результате для данного метода в качестве оптимального вида первичной информации определены контуры трех дискретных двумерных проекционных изображений [3, 4]. Оптимальной пространственной ориентировкой проекционных изображений (ракурсов) является их взаимная ортогональность [5].

Импульсные проекционные изображения с движущихся (летающих) в потоке МО формируются путем их засветки в параллельных лучах от трех импульсных лазерных источников оптического инфракрасного излучения и одновременной их синхронной регистрации с помощью трех соответствующих оптико-электронных датчиков импульсных микроизображений [6, 7]. Время экспозиции мишени видеодетектора  $T_э$  определяется из условия отсутствия смазывания кадра изображения, получаемого с движущегося МО в соответствии с формулой.

$$T_э \leq R \cos \varphi / (v + 0,5 \omega D) K^* , \quad (2)$$

где  $R$  — разрешение видеодетектора по изображению;  $\varphi$  — угол между траекторией движения МО и плоскостью мишени видеодетектора;  $v$  — скорость движения центра массы МО;  $\omega$  — максимальная угловая скорость его вращения;  $D$  — диаметр МО;  $K^*$  — масштаб изображения.

Каждый источник оптического излучения содержит импульсный асинхронный инжекционный полупроводниковый лазер типа ИЛПИ-110 (113) с блоком управления и двухлинзовую оптическую систему формирования параллельного пучка излучения. При этом обеспечивается: длительность импульса излучения (экспозиции) в диапазоне 1-4 мкс; средняя мощность импульса не менее 60 Вт; спектральный диапазон 875-900 нм; частота повторения импульсов не менее 20 Гц; время наработки на отказ 2000 ч [6].

Каждый оптико-электронный (телевизионный) датчик импульсных микроизображений содержит оптическую панкратическую систему формирования двумерного проекционного изображения МО и импульсный позиционно-чувствительный матричный видеодетектор с памятью, работающий в режиме раздельной записи и считывания изображений. При этом обеспечивается: контроль размеров МО в диапазоне 0,4-5,0 мм; пространственное разрешение от 15 до 11 мкм (при оптическом увеличении 2,78<sup>\*</sup>; 4,0<sup>\*</sup>); частота дискретизации выходного видеосигнала 7 МГц; производительность измерений 20-200 кадров/сек [7].

Для сокращения информационной избыточности и повышения быстродействия контроля выполняется пространственное дифференцирование импульсных электронных дискретных изображений МО (выделение их контуров), а для повышения качества этих изображений используется адаптивная пороговая дискриминация строчных сигналов матричных видеодетекторов [8, 9].

В качестве базовых геометрических признаков в данном методе контроля выбраны площади трех взаимноортогональных двумерных проекционных изображений МО ( $s_1, s_2, s_3$ ) и линейные размеры трех его одномерных проекционных изображений на взаимноортогональные оси координат (ракурсы) ( $h_1, h_2, h_3$ ) [3] (рис. 1).

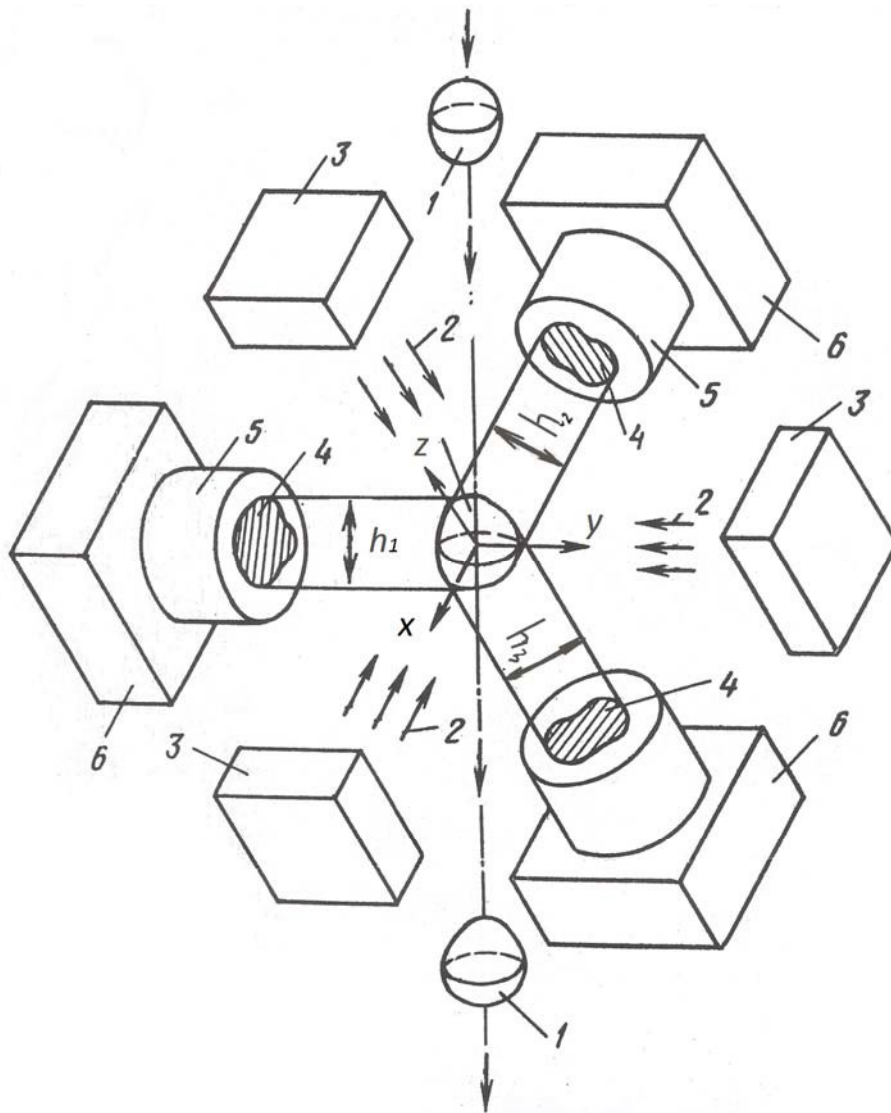


Рис. 1. Лазерный метод оптико-электронного контроля размеров и формы потока МО

На рис. 1: 1 – поток МО; 2 – пучок оптического излучения; 3 – импульсный источник света; 4 – площадь проекционного изображения объекта; 5 – изображающая оптика; 6 – позиционно-чувствительный видеодетектор.

Числовые значения геометрических признаков изображений в зависимости от линейных (габаритных) размеров и пространственной ориентировки (ракурсов) трехмерного МО определяются следующим образом [10]:

$$\begin{cases} h_i = 2 \left[ \sum_{j=1}^3 A_j^2 R_{ji}^2 \right]^{1/2} \\ s_i = \pi A_1 A_2 A_3 \left[ \sum_{j=1}^3 (R_{ji}^2 / A_j^2) \right]^{1/2} \end{cases} \quad (3)$$

где:  $j, i$  – номера проекции и текущей ориентировки (ракурса) МО;  $A_1, A_2, A_3$  — полуоси эллипсоида общего вида, аппроксимирующего МО;  $R$  — матрица поворота МО в пространстве 3D (углы Эйлера  $\alpha, \beta, \gamma$ ):

$$\begin{aligned}
R &= \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} \cos \alpha \cdot \cos \beta & \sin \alpha & -\cos \alpha \cdot \sin \beta \\ -\sin \alpha \cdot \cos \beta & \cos \alpha & \sin \alpha \cdot \sin \beta \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma - \sin \alpha \cdot \sin \gamma & \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot \sin \gamma + \sin \alpha \cdot \sin \gamma & -\cos \alpha \cdot \sin \beta \\ -\sin \alpha \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma - \cos \alpha \cdot \sin \gamma & -\sin \alpha \cdot \cos \beta \cdot \sin \gamma + \cos \alpha \cdot \cos \gamma & \sin \alpha \cdot \sin \beta \\ \sin \beta \cdot \cos \gamma & \sin \beta \cdot \sin \gamma & \cos \beta \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Особенность способа реконструкции геометрических характеристик МО, лежащего в основе данного метода контроля, заключается в том, что вместо статистической реконструкции собственно выпуклого неправильной формы МО осуществляется реконструкция (восстановление) размеров и формы его адекватной (ближайшей) аппроксимации в виде трехмерного изображения (образа) эллипсоида общего вида [1]. При этом геометрические (габаритные размеры) трехмерного МО определяются числовыми значениями взаимно-ортогональных осей трехмерного изображения эллипсоида ( $2A_1$ ,  $2A_2$ ,  $2A_3$ ) и средним проектированным диаметром этого изображения ( $D$ ), а коэффициент формы МО ( $K$ ) определяется отношением максимального и минимального габаритных размеров (осей) изображения аппроксимирующего эллипсоида [1, 3]. Функциональные зависимости (математические модели) этого способа реконструкции для базовых признаков  $h_i$  и  $s_i$  определяются системой уравнений [3]:

$$\begin{cases} A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 = \sum_{i=1}^3 h_i^2 / 4, \\ A_1^2 A_2^2 + A_1^2 A_3^2 + A_2^2 A_3^2 = \sum_{i=1}^3 s_i^2 / \pi^2, \\ A_1^2 A_2^2 A_3^2 = \left[ \sum_{i=1}^3 h_i^2 s_i^2 / 4\pi^2 \right] - \\ \left[ (h_1^2 h_2^2 h_3^2 / 32) \left\{ 1 - \left[ \prod_{i=1}^3 \left[ 1 - (16/\pi^2) (h_i^2 s_i^2 / h_1^2 h_2^2 h_3^2) \right] \right\} \right]^{1/2} \right]. \end{cases} \quad (4)$$

При этом средний проектированный (эквивалентный) диаметр МО ( $D$ ) и коэффициент формы МО ( $K$ ) определяются соответственно из выражений [3]:

$$D = \sum_{i=1}^3 2A_i / 3 ; \quad (5)$$

$$K = \frac{\max\{A_1, A_2, A_3\}}{\min\{A_1, A_2, A_3\}}. \quad (6)$$

Численные оценки предельных возможностей предложенного метода контроля по быстродействию (МО/с), относительной погрешности (%) и достоверности ( $P$ ) проводились с помощью системы имитационного статистического моделирования с использованием эталонных и экспериментальных данных (числовых значений координат точек дискретных контуров изображений), полученных с трехмерных микрообъектов выпуклой неправильной формы различной физической природы (гранулы порошков, микроэлементы ядерного топлива, капли растворов) с размерами от 400 до 1200 мкм и коэффициентом формы от 1,0 до 1,3 отн. ед. [1, 2, 10].

Анализ результатов исследования показал, что производительность контроля составила не менее 100 МО/с, относительная погрешность контроля среднего проектированного диаметра МО составила 0,25% (при  $PD = 0,7$  и  $K = 1,3$  отн. ед.), а относительная погрешность контроля коэффициента формы МО лежит в диапазоне от 2,3% ( $PK = 0,7$ ,  $K = 1,3$  отн.ед.) до 0,6% ( $PK = 0,96$ ,  $K = 1,05$  отн. ед.).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный лазерный метод оптико-электронного реконструктивного контроля движущихся МО по размерам и форме является малоракурсным, обладает оптимальным сочетанием высоких характеристик по быстродействию, точности и достоверности, что обеспечивает минимизацию его аппаратной и программной реализации. Он может быть использован для геометрического автоматического быстродействующего бесконтактного динамического дифференциального объемного прецизионного и достоверного контроля потока МО различной физической природы в реальном масштабе времени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Байбикова Т.Н., Доморацкий Е.П.** Способ динамической реконструкции размеров и формы трехмерных объектов по размерам их проекционных изображений. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки». 2017. № 4.
2. **Доморацкий Е.П.** Методика оценки информативности геометрических характеристик проекционных изображений микрообъектов. // Качество. Инновации. Образование. М.:Изд-во Известия. 2014. №2. С. 42-45.
3. **Доморацкий Е.П.** Метод статистической малоракурсной реконструкции геометрических характеристик трехмерных объектов по их дискретным проекционным изображениям. // Информационные технологии, 2017. № 3, том 23, С. 184-187.
4. **Гонсалес Р., Вудс Р.** Цифровая обработка изображений. М.:Техносфера, 2005. — 1042 с.
5. **Доморацкий Е.П., Байбикова Т.Н.** О выборе ракурсов проекционных изображений при реконструктивном контроле размеров и формы трехмерных объектов. // Материалы II Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли.» Красноярск. Сибирский гос. аэрокосмический университет. 2015. С. 139—142.
6. **Доморацкий Е.П.** Система импульсной экспозиции микрообъектов. // Качество. Инновации. Образование. М.:Изд-во Известия. 2014. № 11. С. 45-49.
7. **Доморацкий Е.П., Петросянц К.О.** Телевизионный датчик импульсных микроизображений. // Датчики и системы. М.:Техинпресс. 2014. № 4. С.19-24
8. **Доморацкий Е.П., Петросянц К.О.** Устройство регистрации импульсного изображения. Патент на изобретение RU 2551895C1.

9. Доморацкий Е.П. Адаптивный дискриминатор видеосигналов. // Качество. Инновации. Образование. М.:Изд-во Известия. 2014. № 5. С. 47-50.
10. Доморацкий Е.П. Алгоритм синтеза геометрических характеристик проекционных изображений трехмерных объектов. // Информационные технологии. 2016. т. 22. №8. С. 597—604.

Е.П. Domorackiy<sup>1,2</sup>, Т.Н. Baybikova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> National Research University «Higher School of Economics», Russia  
101000, Moscow, Myasnitskaya str. 20. E-mail: Domorackiy.E@mfua.ru; tbaibicova@hse.ru

<sup>2</sup> Moscow University of Finance and Law, Russia  
115191, Moscow, St. Serpukhovskiy Val, d. 17, korp. 1, E-mail: Domorackiy.E@mfua.ru;  
tbaibicova@hse.ru

### **LASER METHOD OF OPTOELECTRONIC CONTROL OF THE SIZES AND SHAPE OF FLYING MICROOBJECTS WITH THEIR RECONSTRUCTION BY THEIR IMPULSE PROJECTIVE IMAGES**

In the paper, a fast laser method of the geometrical optoelectronic differential control of three-dimensional micro objects (MO) flow, which is based on the statistical dynamic few-views reconstruction of the sizes and shape of each MO with the usage of the basic characteristics of one triad of their impulse discrete two-dimensional projective images is under consideration. The squares of three mutually orthogonal two-dimensional projective images of MO and linear dimensions of its three one-dimensional projective images onto mutually orthogonal axes are chosen as the main basic characteristics.

Impulse images of moving (flying) MO are formed by their flaring in the parallel rays from impulse laser sources of optical radiation and their simultaneous registration with the usage an optoelectronic position-sensitive video detector with memory, which works in the mode of separate image recording and reading.

The spatial geometrical characteristics of dimensions for each MO are described as linear dimensions (overall dimension) and the average projected diameter ( $D$ ) of a three-dimensional image of the reference ellipsoid that approximates each MO. The shape factor ( $K$ ), which is used when describing the shape of MO, is specified by the ratio of the maximum and minimum overall dimensions (axis) of the approximating ellipsoid.

The speed performance of the method of control under consideration is not less than 100 MO per second. Along with this the relative error of MO diameter control does not exceed 0,25 per cent (with the accuracy  $PD = 0,7$  and  $K = 1,3$  relative units), and the relative error of control of the MO shape factor is in the scope from 2,3 % ( $PK = 0,7$  and  $K = 1,3$  relative units) till 0,6% (with  $PK = 0,96$  and  $K = 1,05$  relative units).

**MICROOBJECT, METHOD OF CONTROL, METHOD OF RECONSTRUCTION,  
GEOMETRICAL CHARACTERISTICS, PROJECTIVE IMAGE, BASIC CHARACTERISTICS  
OF IMAGE**