

## Метод калибровки измерителя на основе фазовой триангуляции для измерений в условиях ограниченного объема с преломлением оптических сигналов

*В. О. Зуев<sup>1\*</sup>, С. В. Двойнишников<sup>1,2</sup>, И. К. Кабардин<sup>2</sup>, В. В. Рахманов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

\* e-mail: vlad.zuev.0017@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлен метод калибровки системы измерения трехмерной геометрии объекта на основе фазовой триангуляции для измерений в условиях ограниченного объема с преломлением оптических сигналов. Алгоритм калибровки реализует выполнение калибровочных процедур непосредственно в измерительном объеме при наличии всех ограничивающих объектов, вызывающих преломление оптических сигналов. Работа метода универсальна для различных условий ограничивающего объема с преломлением оптических сигналов. Проведено тестирование разработанного метода калибровки в случае ограничивающего объема в виде оргстеклянной трубы поперечного 200 мм × 200 мм с толщиной стенок 20 мм и измерительного объема 100 мм × 100 мм × 60 мм. Достигнута точность измерения трехмерной геометрии плоского объекта 12 мкм.

**Ключевые слова:** фазовая триангуляция, преломление оптических сигналов, калибровка

## Measurer calibration method based on phase triangulation for measurements in limited volume with refraction of optical signals

*V. O. Zuev<sup>1\*</sup>, S. V. Dvoynishnikov<sup>1,2</sup>, I. K. Kabardin<sup>2</sup>, V. V. Rakhmanov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: vlad.zuev.0017@mail.ru

**Abstract.** The paper presents a method for calibration of a three-dimensional geometry measurement system based on the phase triangulation for measurements in the conditions of limited volume with optical signals refraction. The calibration algorithm implements calibration procedures directly in the measurement volume in the presence of all the limiting objects that cause optical signals refraction. The method is universal for various conditions of limiting volume with optical signals refraction. The developed calibration method was tested in the case the limiting volume in the form of a plexiglass tube with the transverse size of 200 mm × 200 mm and the wall thickness of 20 mm and the measurement volume of 100 mm × 100 mm × 100 mm. The accuracy of 12 microns was achieved in the measurement of flat object three-dimensional geometry.

**Keywords:** phase triangulation, optical signals refraction, calibration

## *Введение*

Существует широкий спектр научных исследований, направленных на анализ изменения состояния объекта в моделируемых условиях. В случае изменения трехмерной геометрии экспериментального объекта – требуется контроль его трехмерной деформации [1]. Так как применение контактных методов измерения трехмерной геометрии нарушит моделируемые условия, то актуально использование бесконтактных оптических технологий.

Среди оптических методов измерения трехмерной геометрии объекта существенное развитие и широкое применение получил метод фазовой триангуляции [2–4]. Данный бесконтактный метод обладает высокой точностью и скоростью измерения, позволяет выполнять единовременную регистрацию всей сцены и измерять динамично движущиеся объекты. Доступность данного метода определяет перспективность его адаптации для решения задачи контроля трехмерной деформации объекта в условиях ограничивающего объема с преломлением оптических сигналов.

Реализация метода фазовой триангуляции для решения задачи измерения трехмерной геометрии объекта в ограничивающем объеме требует не только позиционирования и настройки измерительной системы, но также и ее калибровки. Проблема калибровки измерительного комплекса возникает вследствие наличия ограничивающих экспериментальный объем стенок, показатель преломления которых отличается от показателя преломления воздуха. Существующие подходы к калибровке измерительной системы [5–7], реализующей метод фазовой триангуляции, в случае позиционирования измерительного объекта в ограничивающем объеме с прозрачными стенками, зачастую пренебрегают фактом наличия среды с изменяющимся показателем преломления. Измерения трехмерной геометрии объекта проводятся с помощью измерительной системы, настроенной и откалиброванной в заводских условиях. В результате нарушается прямолинейность хода луча от источника до приемника излучения, и, следовательно, появляются систематические погрешности в результатах измерения.

Данная работа посвящена разработке метода калибровки системы измерения трехмерной геометрии объекта на основе фазовой триангуляции в условиях ограничивающего объема с изменяющимся показателем преломления. Метод калибровки универсален для различных форм ограничивающего объема.

### *Описание алгоритма калибровки*

Принцип работы триангуляционных методов с использованием структурированного освещения основан на проецировании источником освещения на объект специальной структурированной засветки и регистрации ее искажения с помощью фотоприемника. При этом устройство структурированной засветки предполагает уникальное кодирование областей объекта. Анализируя области объекта с одинаковым кодом на изображениях источника и приемника излучения (рис. 1) и зная их взаимное расположение, вычисляются углы испускания

( $\angle BCA$ ) и регистрации ( $\angle BAC$ ) излучения и становится возможным с помощью стороны  $CA$  и прилегающих к ней углов восстановить расстояние до закодированной области объекта – принцип триангуляции. При этом в случае метода фазовой триангуляции используется синусоидальная структурированная засветка (изображение с параллельными полосами с гармоническим изменением интенсивности), а кодирование происходит с помощью фазы синусоиды.

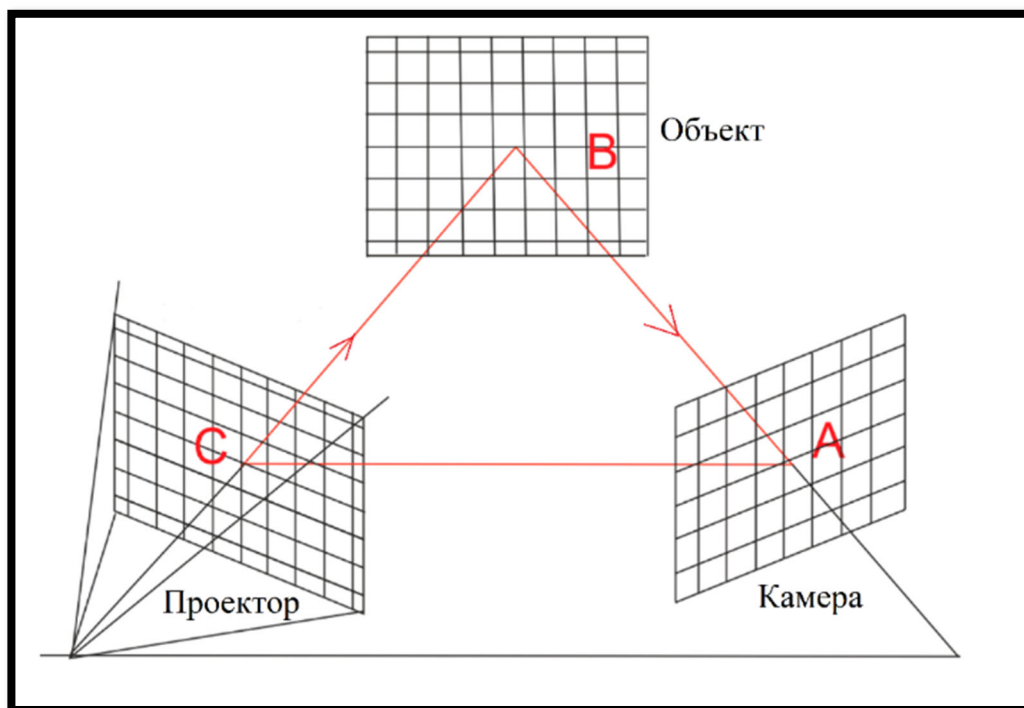


Рис 1. Схема работы триангуляционных методов с использованием структурированного освещения

В случае наличия пространственного изолятора экспериментальной области в виде прозрачных стенок траектория луча, согласно закону Снеллиуса, отклоняется от прямолинейной (рис. 2):

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \quad (1)$$

где  $\theta_1$  – угол падения,  $\theta_2$  – угол преломления,  $n_1$  – показатель преломления первой среды,  $n_2$  – показатель преломления второй среды.

Нарушение прямолинейного распространения излучения препятствует применению принципа триангуляции для измерения трехмерной геометрии объекта методом фазовой триангуляции.

Для решения описанной проблемы разработан универсальный алгоритм калибровки измерителя на основе фазовой триангуляции для измерений в условиях ограниченного объема с преломлением оптических сигналов.

Принцип работы алгоритма основан на установлении взаимно-однозначного соответствия между координатами изображения фотоприемника, фазой модулирующей синусоиды  $(x_c, y_c, \varphi)$  и трехмерными координатами  $(X, Y, Z)$  [8]. Так как данное взаимно-однозначное соответствие вычисляется внутри ограничивающего объема, то в процессе измерения трехмерной геометрии объекта методом фазовой триангуляции исключается погрешность, вызванная отклонением распространения луча от прямолинейного.

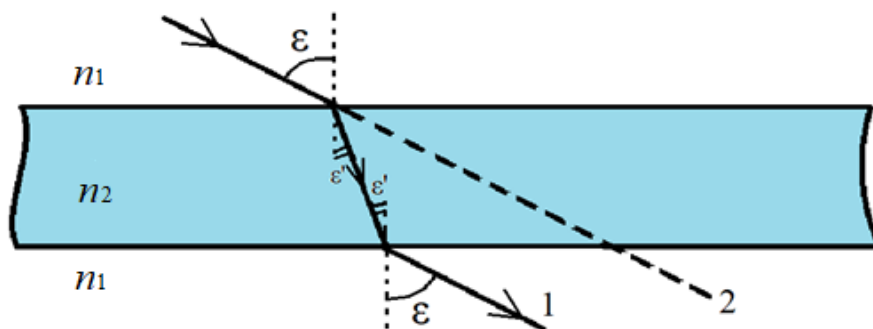


Рис. 2. Отклонение луча от прямолинейного из-за наличия дополнительной среды с отличающимся показателем преломления

Другими словами, установленное взаимно-однозначное соответствие уже учитывает факт наличия пространственного изолятора экспериментальной области.

Для установления описанного взаимно-однозначного соответствия  $(x_c, y_c, \varphi) \leftrightarrow (X, Y, Z)$  используется метод параллельных калибровочных плоскостей. Принцип работы метода основан на применении метода фазовой триангуляции к калибровочной плоскости с последующим ее параллельным сдвигом вдоль измерительного объема. На каждой итерации для каждого пикселя фотоприемника  $(x_c, y_c)$  восстанавливается фаза модулирующего сигнала  $\varphi$ .

Полагая, что ось  $Z$  совпадает с направлением сдвига калибровочных плоскостей, становится известной информация о текущей  $Z$ -компоненте трехмерной координаты. Для восстановления информации о компонентах  $X, Y$  заблаговременно выбирается специальное устройство калибровочной плоскости (например, декартова сетка).

В результате работы описанного метода параллельных калибровочных плоскостей для каждого пикселя фотоприемника  $(x_c, y_c)$  становятся известными взаимно-однозначные соответствия  $(x_c, y_c, \varphi) \leftrightarrow (X_i, Y_i, Z_i)$ , где  $i$  – номер сдвига калибровочной плоскости. Для установления полного взаимно-однозначного соответствия  $(x_c, y_c, \varphi) \leftrightarrow (X, Y, Z)$  для каждого пикселя фотоприемника  $(x_c, y_c)$  и каждой компоненты  $X, Y, Z$  трехмерной координаты строятся регрессионные кривые (рис. 3).

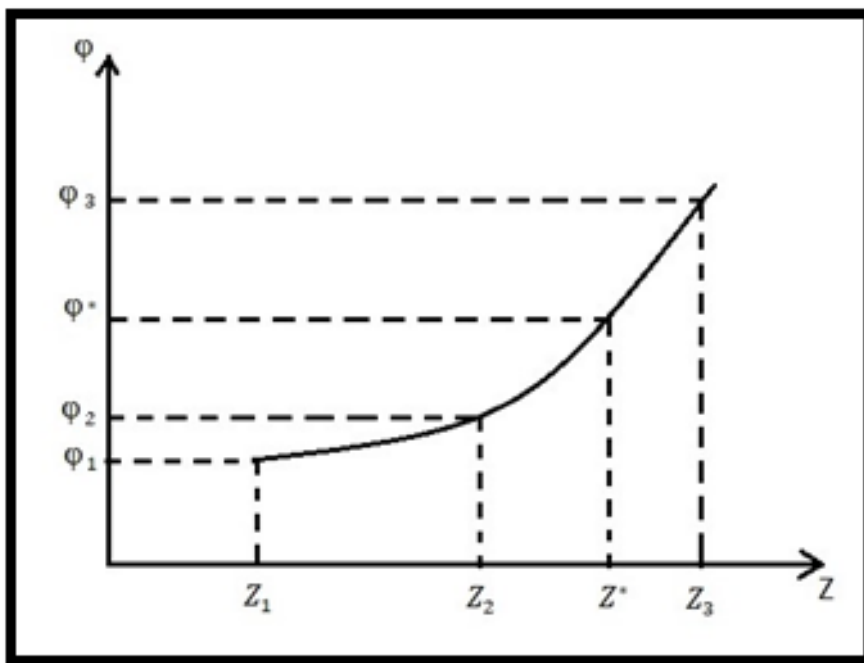


Рис. 3. Регрессионная кривая для построения взаимно-однозначного соответствия между фазой модулирующей синусоиды  $\varphi$  и  $Z$ -компонентой координаты в заданном пикселе фотоприемника  $(x_c, y_c)$

В процессе измерения трехмерной геометрии объекта методом фазовой триангуляции восстанавливается фазовое распределение  $\varphi^*$ , и далее с помощью построенных регрессионных кривых для каждого пикселя фотоприемника  $(x_c, y_c)$  восстанавливается трехмерная координата объекта  $(X^*, Y^*, Z^*)$ .

### *Тестирование метода калибровки*

Выполнено тестирование разработанного метода калибровки измерителя на основе фазовой триангуляции для измерений в условиях ограниченного объема с преломлением оптических сигналов. Тестирование произведено для системы измерения (рис. 4) трехмерной геометрии сложнопрофильных объектов в процессе аэродинамических исследований на экспериментальном стенде.

Измерительная система включала фотоприемник Imaging Source DMK 33GX264 с объективом Imaging Source TCL 5026 5MP, цифровой проектор Excelvan CL720 с разрешением  $1280 \times 800$  и светосилой 3000 лм с доработанной оптической системой для формирования резкого изображения на расстоянии 60–80 см. Расстояние от источника освещения до объекта составило 60 см, расстояние от фотоприемника до объекта – 125 см. Угол между оптическими осями источника и приемника оптического излучения  $70^\circ$ . При этом объект помещался в трубу из оргстекла с поперечным сечением  $200 \text{ мм} \times 200 \text{ мм}$  и толщиной стенок 20 мм.

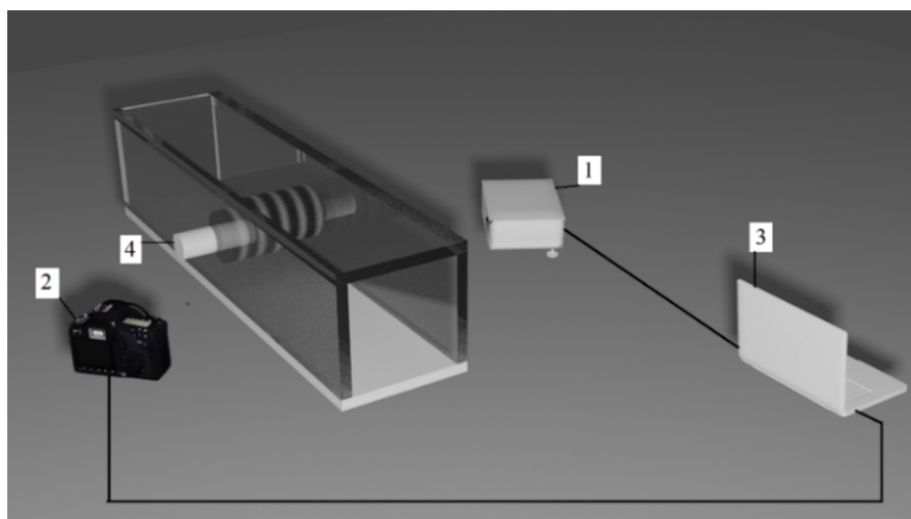


Рис. 4. Схема измерительного комплекса для измерения трехмерной геометрии сложнопрофильных объектов в процессе аэродинамических исследований:

1 – проектор, 2 – фотоприемник, 3 – компьютер, 4 – объект

В процессе калибровки измерительного комплекса установка калибровочной плоскости в ограничивающем объеме произведена через один из концов оргстеклянной трубы (рис. 5).

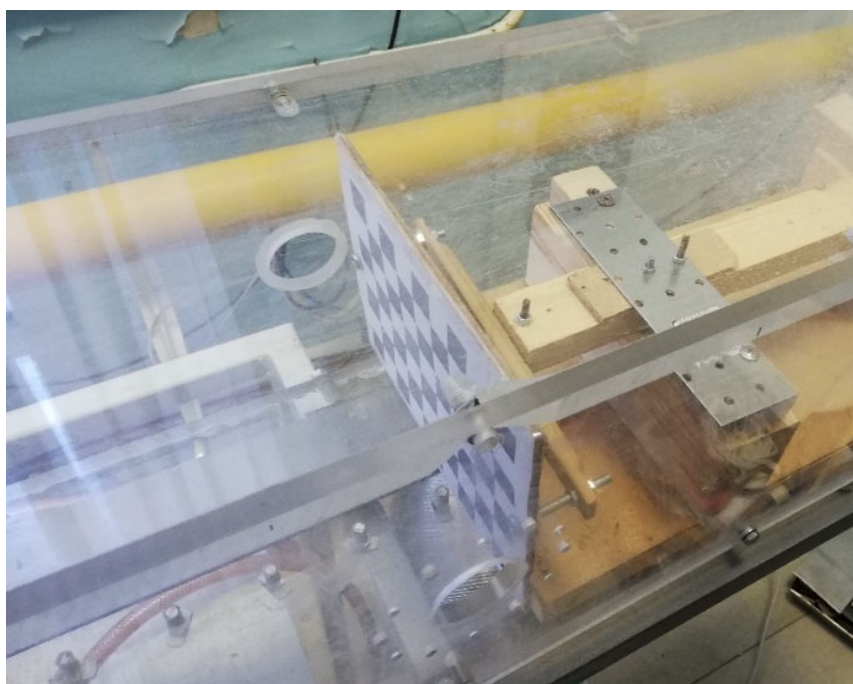


Рис. 5. Установка калибровочной поверхности в ограничивающем объеме

В результате произведена калибровка измерительной системы для измерительного объема с характерным размером  $100 \text{ мм} \times 100 \text{ мм} \times 60 \text{ мм}$ . Достигнута точность измерения трехмерной геометрии плоского объекта  $12 \text{ мкм}$  (рис. 6).

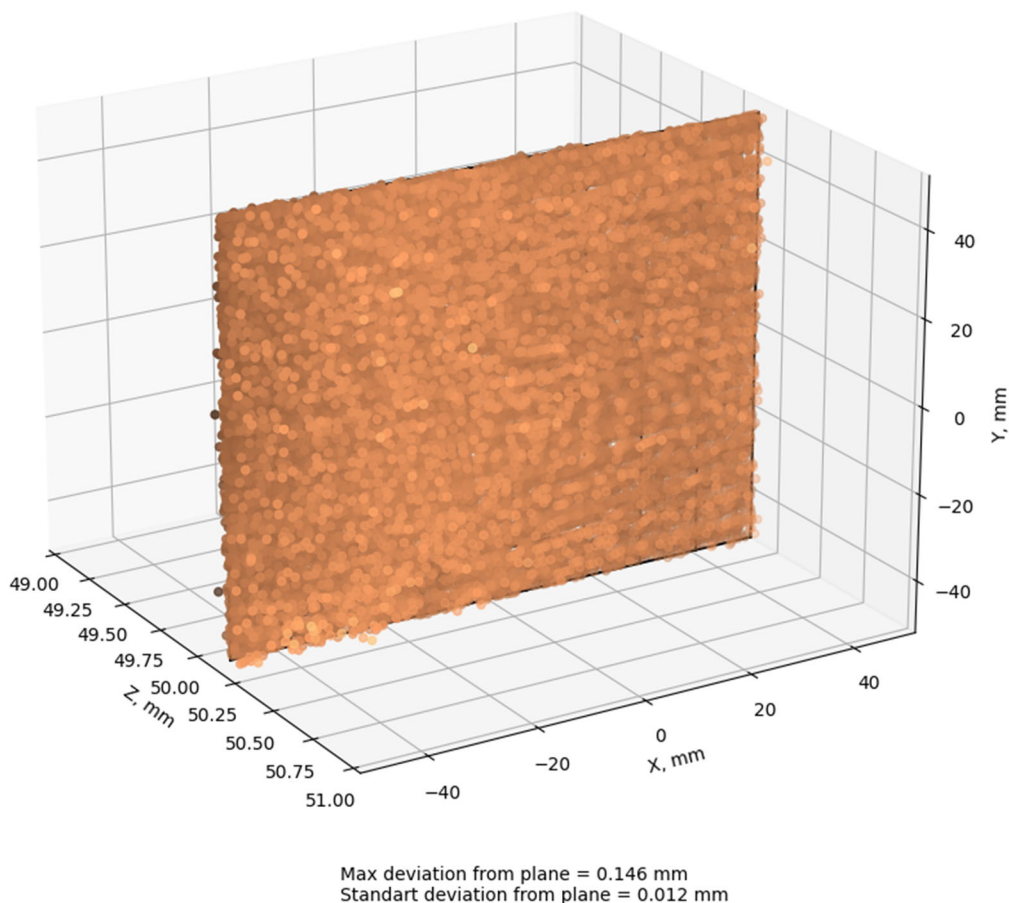


Рис. 6. Результат измерения плоской поверхности в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов

### *Заключение*

В работе предложен метод калибровки измерительного комплекса на основе фазовой триангуляции для измерений в условиях ограниченного объема с преломлением оптических сигналов. Принцип метода основан на выполнении калибровочных процедур непосредственно в области измерения при наличии всех ограничивающих объектов, вызывающих преломление оптических сигналов. В результате калибровки формируются регрессионные кривые, позволяющие построить взаимно-однозначное соответствие между координатами пикселя на фотоприемнике и локального сдвига фазы и трех ортогональных координат точки на измеряемой поверхности. Выполнено тестирование калибровки измерительного комплекса на экспериментальном стенде для аэродинамических исследований в объеме  $100 \text{ мм} \times 100 \text{ мм} \times 60 \text{ мм}$ , ограниченном прозрачными стенками. В результате достигнута погрешность измерения на уровне 12 мкм. Предложенный метод калибровки применим для настройки измерительных систем в произвольных условиях ограничивающего объема с преломлением оптических сигналов.



## *Благодарности*

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dvoynishnikov S.V., Kabardin I.K., Meledin V.G. (2020) Advanced Phase Triangulation Methods for 3D Shape Measurements in Scientific and Industrial Applications. In: Sergiyenko O., Flores-Fuentes W., Mercorelli P. (eds) Machine Vision and Navigation. Springer, Cham.
2. Gorthi S.S., Rastogi P. Fringe projection techniques: Whither we are? / Optics and Lasers in Engineering 48 (2010). – P. 133–140.
3. Zhang S. Recent progresses on real-time 3-D shape measurement using digital fringe projection techniques // Opt. Lasers Eng. 48(2), 149–158 (2010).
4. M. Gruber, G. Hausler: Simple, robust and accurate phase-measuring triangulation. Optik. 1992. – № 3. – С. 118–122.
5. De Piero F. W., Trivedi M. M. 3-D computer vision using structured light: Design, calibration, and implementation issues // Advances in Computers, 1996, V.43. – P.243–278.
6. McIvor A.M., Valkenburg R.J. Calibrating a structured light system // Auckland: Industrial Research Limited Report 362, 1995. – 17 p.
7. Chen L.C., Liang C.W., Nguyen X.L., Shu Y.S., Hsiao-Wen Wu. High-speed 3D surface profilometry employing trapezoidal phase-shifting method with multi-band calibration for colour surface reconstruction // Meas. Sci. Technol., 2010, V.21. – P. 105309–10.
8. Двойнишников С.В., Меледин В.Г. Способ бесконтактного измерения линейных размеров трехмерных объектов // Патент РФ №2433372, дата регистрации 10.11.11.

© В. О. Зуев, С. В. Двойнишников, И. К. Кабардин, В. В. Рахманов, 2022