

Система измерения трёхмерной геометрии методами фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея: программный комплекс для настройки

Владислав Олегович Зуев¹, Сергей Владимирович Двойнишников^{2✉}, Иван Константинович Кабардин³, Владимир Генриевич Меледин⁴

^{1, 2} Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

^{1, 2, 3, 4} Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

¹vlad.zuev.0017@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8317-3278>

²dv.s@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-0018-7675>

³ivankabardin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2002-2998>

⁴meledin@itp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3765-342X>

Аннотация. Рассмотрены системы измерения трёхмерной геометрии объекта методами фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея. Проанализированы сложности настройки такой системы, возникающие при нестандартных условиях измерений, когда требуется адаптировать элементы системы к окружающим условиям. Для оптимизации параметров указанной системы измерения предложены количественные оценки качества настройки системы, основанные на результатах измерения трёхмерной геометрии объекта и промежуточных измерительных данных. Разработаны алгоритмы расчёта количественных оценок качества работы системы измерения. Создан программный комплекс из двух программ, реализующий обработку и визуализацию результатов измерения трёхмерной геометрии объекта и промежуточных измерительных данных, а также вывод на монитор количественных оценок качества работы системы измерения. Программный комплекс протестирован при настройке системы измерения трёхмерной геометрии наледи на стенде для исследования эффектов обледенения уменьшенных моделей функциональных элементов ветрогенератора. Система измерения настроена на характерный измерительный объём 85×67×25 мм. Оптимизированы частота модулирующего сигнала и параметры оптической системы: взаимное расположение и фокусные расстояния источника и приёмника оптического излучения; длительность экспозиции; усиление аналогового сигнала приёмника. Погрешность измерения трёхмерной геометрии составила 9 мкм. Для системы измерения трёхмерной геометрии объекта методами фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея подтверждена возможность настройки с помощью разработанного программного комплекса. Программный комплекс можно использовать в областях, где требуется адаптация параметров системы измерения трёхмерной геометрии методами фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея к окружающим условиям, например, ветро- и гидроэнергетика, горячая металлургия.

Ключевые слова: измерение трёхмерной геометрии, фазовая триангуляция, бинарные коды Грея, настройка системы измерения

Для цитирования: Зуев В. О., Двойнишников С. В., Кабардин И. К., Меледин В. Г. Система измерения трёхмерной геометрии методами фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея: программный комплекс для настройки // Измерительная техника. 2022. № 8. С. 46–51. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-46-51>

A three-dimensional measurement system based on the phase triangulation and binary Grey codes methods: the software package for configuration

Vladislav O. Zuev¹, Sergey V. Dvoynishnikov^{2✉}, Ivan K. Kabardin³, Vladimir G. Meledin⁴

^{1, 2} Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

^{1, 2, 3, 4} Kutateladze Institute of thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

¹vlad.zuev.0017@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8317-3278>

²dv.s@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-0018-7675>

³ivankabardin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2002-2998>

⁴meledin@itp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3765-342X>

Abstract. Three-dimensional object geometry measurement systems based on the phase triangulation and binary Grey codes methods were considered. Such system configuration difficulties: under non-standard measurement conditions when it is necessary

to adapt system elements to environmental conditions were analyzed. To ensure the possibility of optimal measurement system parameters search, the measurement system configuration quality quantitative estimates based on object three-dimensional geometry measurement results and intermediate measurement data were introduced. The measurement system configuration quality quantitative estimates calculation algorithms were developed. The software package, consisting of two programs, that allows to process and visualize object three-dimensional geometry measurement results and intermediate measurement data and to display measurement system operation quality quantitative estimates was created. The software package was tested on the ice three-dimensional measurement system that is used in the icing of reduced wind generator functional elements effects studying stand. The measurement system was configured for the measurement volume with the characteristic size of 85×67×25 mm. The modulation signal frequency and the optical system parameters were optimized: the optical radiation source and receiver relative location, their focal lengths, the receiver exposure time and analog signal gain value. The three-dimensional geometry measurement error of 9 μm was achieved. The three-dimensional object geometry measurement system based on the phase triangulation and binary Grey codes methods configuration possibility with the help of the developed software package was confirmed. The software package can be used in spheres where it is necessary to adapt parameters of the three-dimensional geometry measurement system based on the phase triangulation and binary Grey codes methods to environmental conditions, for example, wind and hydropower, hot metallurgy.

Keywords: three-dimensional geometry measurement, phase triangulation, binary Grey codes, measurement system configuration

Введение. Измерение трёхмерной геометрии объекта – процесс сбора данных, содержащих информацию о геометрических параметрах объекта. Информация о геометрических параметрах объекта может быть как неявной (по тени цилиндрической фигуры можно узнать численное значение диаметра цилиндра), так и явной (по набору точек с координатами x , y , z в трёхмерном пространстве, лежащих на поверхности объекта, можно восстановить поверхность объекта).

Существуют актуальные научно-технические задачи, направленные на повышение метрологических характеристик и расширение сферы применения методов измерения трёхмерной геометрии объекта [1, 2]. Для решения указанных задач перспективно развивать метод фазовой триангуляции [1], к достоинствам которого относятся высокая точность и быстрота измерения, простота использования и низкая стоимость комплектующих для приборной реализации.

Метод фазовой триангуляции с помощью структурированного освещения востребован в медицине при трёхмерных стоматологических измерениях [3], мониторинге сосудистых деформаций [4], измерении трёхмерных характеристик формы тела человека [5, 6], диагностике и мониторинге сколиоза [7, 8], трёхмерном исследовании ран [9, 10], измерении топографии кожи в косметологии [11, 12]. Кроме того, методы 3D-сканирования используются в промышленных и научных приложениях, таких как диагностика компонентов микроэлектромеханических систем [13, 14], анализ вибрации [15, 16], рефрактометрические приложения [17], измерение деформации поверхности [18, 19], измерение толщины листового металла [20], контроль коррозии на основе измерения трёхмерного профиля [21, 22], измерение шероховатости поверхности [23, 24], обратный инжиниринг [25–27], контроль качества изготовления печатных плат [28–30], тепловой поток визуализации [31].

Для минимизации погрешности измерений трёхмерной геометрии объекта методами фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея перед началом измерений единожды подбирают и устанавливают параметры измерительных методов и функциональных оптических элементов (источника и приёмника оптического излучения) [32, 33]. В случае измерительных методов (метода фазовой триангуляции) оптимизируют частоту модулирующего сигнала, увеличение которой с одной стороны ограничено

невозможностью получить абсолютно резкое изображение, но с другой целесообразно, так как погрешность измерения координаты z (глубины сцены) согласно [34, 35] обратно пропорциональна частоте пространственной модуляции излучения:

$$\Delta z = \Delta I p / (2\pi I \sqrt{N} \operatorname{tg} \theta),$$

где p – период пространственной модуляции; θ – угол триангуляции; $\Delta I / I$ – относительная погрешность фотоприёмника; N – количество фазовых изображений.

В случае функциональных оптических элементов (источника и приёмника оптического излучения) оптимизируют их взаимное расположение, фокусные расстояния, резкость изображения, длительность экспозиции и усиление аналогового сигнала фотоприёмника [36].

Итоговые значения оптимизируемых параметров зависят от размера измерительного объёма, взаимного расположения источника и приёмника излучения, внешних условий освещения, отражающих свойств поверхности измеряемого объекта [34]. Поэтому при изменении условий измерений, например, в случае перемещения системы измерения трёхмерной геометрии объекта методами фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея (далее – системы) в другое помещение или при измерениях объектов другого типа, необходимо заново настраивать параметры системы. Для повышения эффективности работы системы и минимизации погрешности измерений требуется автоматизировать подбор её оптимальных параметров. Для автоматического подбора оптимальных параметров необходимо разработать алгоритм расчёта количественной оценки качества работы системы, например расчёта погрешности измерения трёхмерной геометрии объекта. Существенным недостатком данного подхода являются большие временные затраты на перекалибровку измерителя после каждого изменения параметров системы. Поэтому необходим альтернативный алгоритм количественной оценки работы системы, который не требует её калибровки и позволяет выполнять оценку по промежуточным измерительным данным, полученным в результате одного пробного измерения.

Цель статьи – создание программного комплекса для настройки системы измерения трёхмерной геометрии методами фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея. Программный

комплекс состоит из двух программ, позволяющих обрабатывать и визуализировать результаты измерения трёхмерной геометрии объекта и промежуточные измерительные данные, а также рассчитывать и выводить на монитор количественные оценки качества работы измерительной системы.

Количественные оценки качества работы системы. К критериям оптимизации параметров системы авторы настоящей статьи отнесли минимизации уровня шума в результатах расшифровки фазовых изображений и бинарных кодов и погрешности измерения трёхмерной геометрии плоского объекта. Для этих критериев разработаны алгоритмы расчёта количественной оценки качества работы измерительной системы.

Алгоритм расчёта погрешности измерения плоского объекта. Алгоритм состоит из следующих шагов:

- 1) измерение трёхмерной геометрии плоского объекта;
- 2) поиск плоскости $Ax + By + Cz + D = 0$, аппроксимирующей набор измеренных точек объекта;
- 3) расчёт расстояний d_i от каждой измеренной точки с координатами (x_i, y_i, z_i) до найденной аппроксимирующей плоскости по формуле

$$d_i = \frac{|Ax_i + By_i + Cz_i + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}};$$

- 4) расчёт стандартного отклонения σ точек от аппроксимирующей плоскости по выражению $\sigma = \sqrt{n^{-1} \sum (d_i - \bar{d})^2}$, где $\bar{d}$ – среднее расстояние от точек до найденной аппроксимирующей плоскости; n – количество точек. Погрешность измерения трёхмерной геометрии плоского объекта принимается равной найденному значению стандартного отклонения.

Набор точек аппроксимируется плоскостью согласно разработанному алгоритму, основанному на методе линейной регрессии. Задача поиска коэффициентов плоскости (A, B, C, D) сводится к задаче линейной регрессии, при решении которой находят коэффициенты P_0, P_1, P_2 : $P_0 + P_1x + P_2y = z$. Далее рассчитываются искомые коэффициенты аппроксимирующей плоскости: $A = P_1; B = P_2; C = -1; D = P_0$.

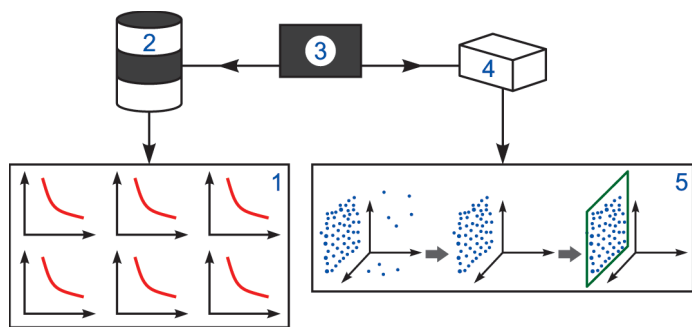


Рис. 1. Структура программного комплекса:

1, 5 – программы 1, 2 соответственно; 2 – промежуточные измерительные данные; 3 – система измерения; 4 – измеренная трёхмерная геометрия объекта

Fig. 1. Software package structure:

1, 5 – programs 1, 2, respectively; 2 – intermediate measurement data; 3 – measurement system; 4 – measured three-dimensional geometry

Алгоритм расчёта уровня шума в результатах расшифровки фазовых изображений и бинарных кодов Грея. Алгоритм основан на анализе промежуточных измерительных данных, которые система собирает в процессе одного измерения [37]:

результатов регистрации фотоприёмником равномерной засветки, яркость которой на каждом шаге линейно увеличивается. Используется для оценки нелинейности тракта источник – приёмник излучения;

результатов расшифровки измерений методом бинарных кодов Грея и методом фазовых шагов;

результатов расчёта проецируемых координат для каждой точки на принимаемых изображениях по результатам регистрации и расшифровок;

результатов вычисления трёхмерных координат объекта по экспериментальным и калибровочным данным.

Алгоритм содержит следующие шаги:

- 1) измерение трёхмерной геометрии плоского объекта;
- 2) построение зависимости результатов вычисления проецируемых координат источника излучения от координаты изображения фотоприёмника вдоль выбранного пользователем горизонтального пиксельного среза;
- 3) обработка полученной зависимости фильтром высоких частот;
- 4) вычисление среднего квадратического отклонения (СКО) полученной зависимости.

Численная оценка уровня шума в результатах расшифровки фазовых изображений и бинарных кодов Грея принимается равной найденному СКО.

Структура программного комплекса. Программный комплекс для настройки системы измерения трёхмерной геометрии методами фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея состоит из двух программ. Программа 1 анализирует и визуализирует промежуточные результаты работы алгоритмов системы измерения, программа 2 – результаты измерения трёхмерной геометрии объекта. Каждая программа вычисляет количественную оценку качества работы системы измерения с текущими настройками. Компьютер подключён к системе, поэтому обеспечивается импорт результатов измерения трёхмерной геометрии объекта и промежуточных измерительных данных в соответствующие программы (рис. 1).

Программа 1 рассчитывает уровень шума в результатах расшифровки фазовых изображений и бинарных кодов Грея на основе промежуточных измерительных данных. Пользователю требуется указать анализируемый пиксельный срез изображения фотоприёмника (набор пикселей матрицы фотоприёмника $\{(x_i, y) | x_start < x_i < x_end\}$, вдоль которого собираются и анализируются промежуточные измерительные данные), и программа автоматически рассчитает уровень шума и выведет его на экран монитора. Дополнительно на экран выводятся шесть графиков, визуализирующих информацию о промежуточных данных системы после каждого шага работы: зависимость регистрируемой интенсивности в точке на поверхности измеряемого объекта от яркости проектора; зависимости результатов расшифровки бинарных кодов Грея, результатов расшифровки фазовых изображений, а также результатов расшифровки

их комбинации от координаты изображения фотоприёмника вдоль выбранного пиксельного среза; зависимости результатов расшифровки бинарных кодов Грея и результатов расшифровки фазовых изображений от координаты изображения фотоприёмника вдоль выбранного пиксельного среза с применением фильтра высоких частот.

Информация на графиках помогает пользователю определить, какие параметры следует оптимизировать. Например, зависимость регистрируемой интенсивности в точке на поверхности измеряемого объекта от яркости проектора указывает, как экспозиция фотоприёмника и размер диафрагмы согласованы с яркостью источника излучения и фоновым освещением:

если интенсивность регистрируемого излучения непрерывно увеличивается от минимально возможного значения до максимального, то экспозиция оптимальна;

если максимальное значение зарегистрированной интенсивности меньше максимально возможного значения более чем в два раза, то следует увеличить экспозицию;

если минимальное значение зарегистрированной интенсивности больше половины максимального значения, то следует уменьшить экспозицию.

Программа 2 вычисляет погрешность измерения плоского объекта. При запуске программы на экране компьютера автоматически появляется трёхмерный график с набором измеренных точек. В наборе могут присутствовать точки, не относящиеся к измеряемому объекту (например, точки поверхности произвольных объектов, попавших в измерительный объём). Для их исключения из анализируемого массива реализована возможность пространственной фильтрации результатов измерения:

$$P = \{(x_i, y_i, z_i) | x_{\min} < x_i < x_{\max}, \\ y_{\min} < y_i < y_{\max}, z_{\min} < z_i < z_{\max}\},$$

где P – массив точек после фильтрации, (x_i, y_i, z_i) – координаты i -й измеренной точки; $x_{\min}$, $x_{\max}$, $y_{\min}$, $y_{\max}$, $z_{\min}$, $z_{\max}$ – границы анализируемого измерительного объёма, задаваемые пользователем.

После пространственной фильтрации набора измеренных точек программа аппроксимирует набор плоскостью и выводит на монитор рассчитанное численное значение погрешности измерения трёхмерной геометрии плоского объекта.

Программный комплекс разработан на языке программирования Python3 с применением библиотек Sklearn и PyQt5.

Тестирование программного комплекса. Систему измерения трёхмерной геометрии налади на стенде для исследования эффектов обледенения уменьшенных моделей функциональных элементов ветрогенератора настраивали с целью учёта внешних условий освещения и отражающих свойств измеряемой поверхности и боковых стенок канала, в котором находился объект измерения. Система включала фотоприёмник Imaging Source DMK 33GX264 с объективом Imaging Source TCL 5026 5MP (The Imaging Source, Германия), цифровой проектор Excelvan CL720 (Cheerlux, Китай) с разрешением 1280×800, светосилой 3000 лм и доработанной оптической системой для формирования резкого изображения на расстоянии 60–80 см.

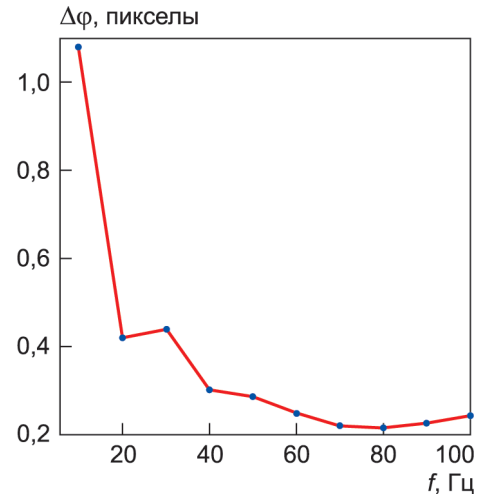


Рис. 2. Зависимость погрешности $\Delta\varphi$ измерения начального фазового сдвига при измерении методом фазовых шагов от частоты f модулирующего сигнала

Fig. 2. Dependence of the measurement error of the initial phase shift $\Delta\varphi$ when measured by the phase step method on the frequency of the modulating signal f

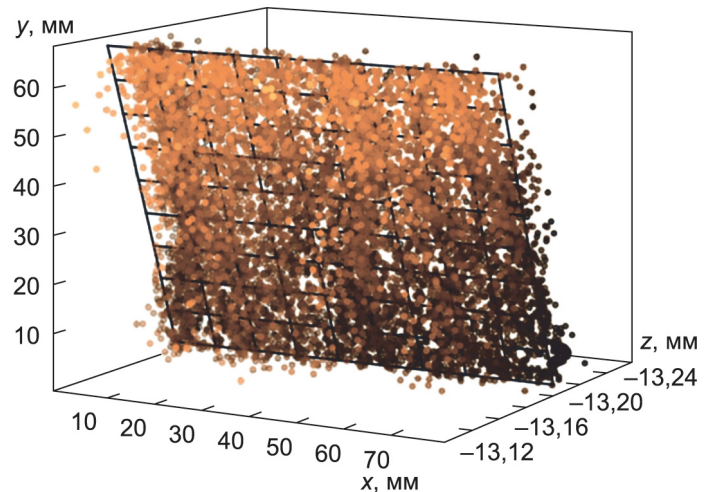


Рис. 3. Измеренные координаты плоской поверхности и результаты аппроксимации трёхмерных точек объекта плоскостью

Fig. 3. Measured coordinates of a flat surface and the results of approximation of three-dimensional points of an object by a plane

С помощью разработанного программного комплекса систему измерения настраивали на характерный измерительный объём 85×67×25 мм по следующему алгоритму:

- 1) выбирали текущий оптимизируемый параметр системы (например, экспозицию);
- 2) выполняли ряд однократных измерений трёхмерной геометрии плоского объекта с различными значениями оптимизируемого параметра и зафиксированными остальными параметрами. Программа 1 строила зависимость уровня шума в результатах расшифровки фазовых изображений и бинарных кодов Грея от значения текущего оптимизируемого параметра (рис. 2);

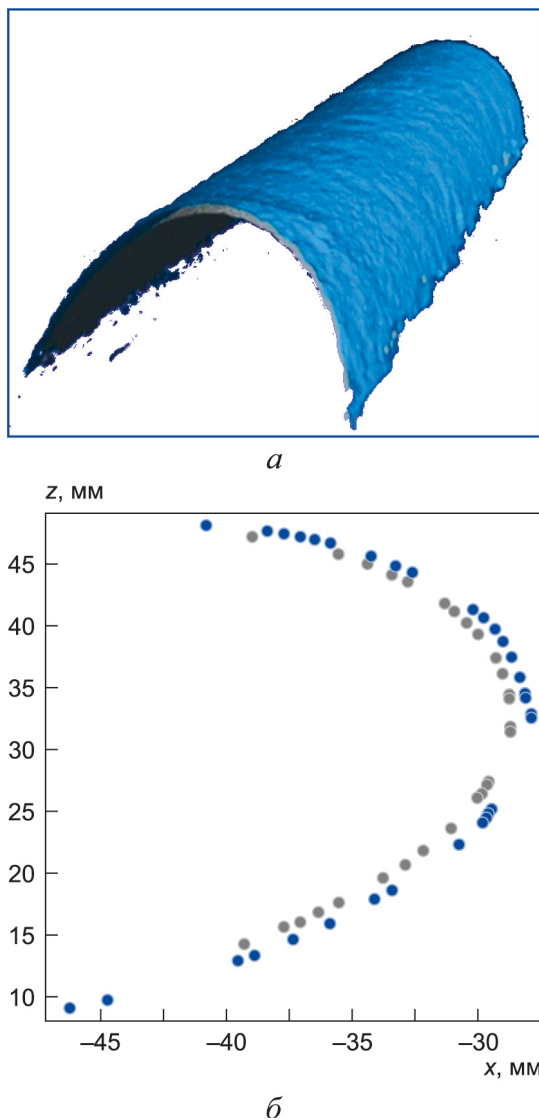


Рис. 4. Результаты измерения трёхмерного профиля цилиндрической поверхности:

a – трёхмерная поверхность до (серая поверхность) и после (синяя поверхность) обледенения; *б* – профиль среза измеренной цилиндрической поверхности (синие точки)

Fig. 4. Results of measuring a three-dimensional profile of a cylindrical surface:

a) three-dimensional surface before icing (gray surface) and after icing (blue surface); *b*) cut profile of the measured cylindric surface (blue dots)

3) в качестве оптимального значения текущего оптимизируемого параметра выбирали то, при котором минимизировался уровень шума в результатах расшифровки фазовых изображений и бинарных кодов Грея.

Расстояние от источника освещения до объекта составляло 65 см, расстояние от фотоприёмника до объекта – 150 см, угол между оптическими осями источника и приёмника оптического излучения 70°. Итоговая погрешностью измерения, рассчитанная программой 2, составляла 9 мкм (рис. 3).

После настройки системы измерения выполняли эксперименты по измерению трёхмерной геометрии наледи на цилиндрической поверхности (рис. 4, *a*, *б*). В результате анализа

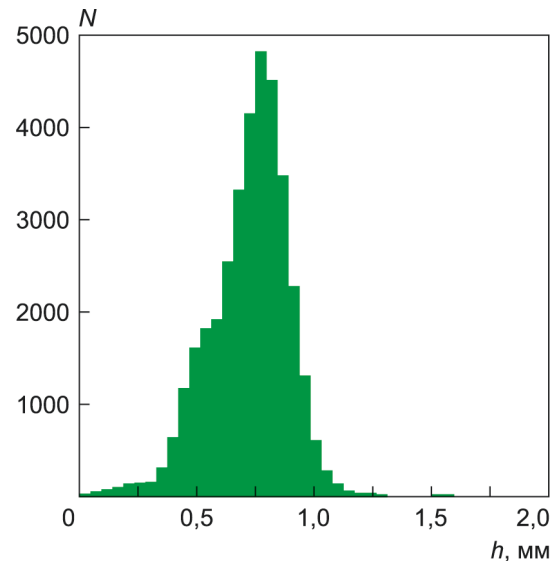


Рис. 5. Гистограмма значений толщины h наледи, вычисленных для каждой области исходной поверхности объекта

Fig. 5. Histogram constructed from all values of the thickness h of the ice build-up calculated for each area of the initial surface of the object

экспериментальных данных вычисляли локальную толщину ледяного нароста и определяли статистические характеристики толщины ледяного нароста (рис. 5): средняя толщина 0,84 мм, медианная толщина 0,75 мм.

Заключение. Разработка программного комплекса позволила решить задачу настройки системы измерения трёхмерной геометрии объекта методами фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея в нестандартных условиях измерений. Систему измерения удалось успешно адаптировать к новым условиям. Созданный программный комплекс позволяет обрабатывать и визуализировать результаты измерения трёхмерной геометрии объекта, промежуточные измерительные данные и выводить на экран компьютера количественные оценки качества работы системы измерения. Поскольку программный комплекс не зависит от конкретных реализаций оптических элементов, он универсален для различных систем измерения трёхмерной геометрии объекта методами фазовой триангуляции и бинарных кодов Грея.

Список источников / References

1. Меледин В. Г. Оптоэлектронные информационные системы для науки и промышленности // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014. Т. 5. № 1. С. 3–12 [Meledin V. G., Optoelectronic Information Systems for Science and Industry, *Interekspo Geo-Sibir'*, 2014, vol. 5, no. 1, pp. 3–12. (In Russ.)].
2. Чузуй Ю. В. Трёхмерные оптико-электронные измерительные системы и лазерные технологии для научных и промышленных применений // Автометрия. 2015. Т. 51. № 4. С. 76–91 [Chugui Yu. V. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2015, vol. 51(4), pp. 385–397. <https://doi.org/10.3103/S8756699015040093>].
3. Chen L., Huang C., *Meas. Sci. Techn.*, 2005, vol. 16 (5), pp. 1061–1068. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/16/5/003>

4. Genovese K., Pappalettere C., *Opt. Laser Eng.*, 2006, vol. 44(12), pp. 1311–1323.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2005.12.005>
5. Lilley F., Lalor M. J., Burton D. R., *Opt. Eng.*, 2000, vol. 39(1), pp. 187–195. <https://doi.org/10.1117/1.602351>
6. Moore C. J., Burton D. R., Skydan O., Sharrock P. J., Lalor M., *Proc. Int. Conf. Medical Information Visualisation – BioMedical Visualisation*, 2006, 1691277, pp. 97–102. <https://doi.org/10.1109/MEDVIS.2006.3>
7. Hanafi A., Gharbi T., Cornu J., *Appl. Opt.*, 2005, vol. 44(12), pp. 2266–2273. <https://doi.org/10.1364/AO.44.002266>
8. Berryman F., Pynsent P., Fairbank J., Disney S., *European Spine Journal*, 2008, vol. 17 (5), pp. 663–672.
<https://doi.org/10.1007/s00586-007-0581-x>
9. Hain T., Eckhardt, Kunzi-Rapp K., Schmitz B., *Medical Laser Application*, 2002, vol. 17 (1), pp. 55–58.
<https://doi.org/10.1078/1615-1615-00047>
10. Ferraq Y., Black D., Lagarde J. M., Schmitt A. M., Dahan S., Grolleau J. L., Mordon S., *Skin Research and Technology*, 2007, vol. 13(4), pp. 399–405. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0846.2007.00243.x>
11. Jaspers S., Hopermann H., Sauermann G., Hoppe U., Lunderstädt R., Ennen J., *Skin Research and Technology*, 1999, vol. 5 (3), pp. 195–207. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0846.1999.tb00131.x>
12. Lagarde J. M., Rouvrais C., Black D., Diridollou S., Gall Y., *Skin Research and Technology*, 2001, vol. 7(2), pp. 112–121.
<https://doi.org/10.1034/j.1600-0846.2001.70210.x>
13. Quan C., Tay C. J., He X. Y., Kang X., Shang H. M., *Opt. Laser Techn.*, 2002, vol. 34 (7), pp. 547–552.
[https://doi.org/10.1016/S0030-3992\(02\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0030-3992(02)00070-1)
14. He X., Sun W., Zheng X., Nie M., *Key Engineering Materials*, 2006, vol. 326–328, pp. 211–214.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.326-328.211>
15. Yilmaz S. T., Ozugurel U. D., Bulut K., Inci M. N., *Opt. Commun.*, 2005, vol. 249(4–6), pp. 515–522.
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2005.01.032>
16. Zhang Q., Su X., *Opt. Express*, 2005, vol. 13(8), pp. 3110–3116. <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.003110>
17. De Angelis M., De Nicola S., Ferraro P., Finizio A., Pierattini G., *Opt. Commun.*, 2000, vol. 175(4), pp. 315–321.
[https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(00\)00477-6](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(00)00477-6)
18. Zhang Q., Su X., *Opt. Laser Technol.*, 2002, vol. 34(2), pp. 107–113. [https://doi.org/10.1016/S0030-3992\(01\)00097-4](https://doi.org/10.1016/S0030-3992(01)00097-4)
19. Cobelli P. J., Maurel A., Pagneux V., Petitjeans P., *Experiments in Fluids*, 2009, vol. 46(6), pp. 1037–1047.
<https://doi.org/10.1007/s00348-009-0611-z>
20. Roger Ernst R. V., Weckenmann A., Local Wall Thickness Measurement of Formed Sheet Metal Using Fringe Projection Technique, *Proceedings XVII IMEKO World Congress, Metrology in the 3rd Millennium*, June 22–27, 2003, Dubrovnik, Croatia, 2003, pp. 1802–1805.
21. Huang P. S., Jin F., Chiang F., *Opt. Laser Eng.*, 1999, vol. 31(5), pp. 371–380. [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(99\)00019-6](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(99)00019-6)
22. Jang P., et al, *Proc. SPIE*, 2006, 6377 (63770S)
<https://doi.org/10.1117/12.694358>
23. Spagnolo G. S., Ambrosini D., *Physical*, 2002, vol. 100 (2–3), pp. 180–186. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(02\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(02)00051-1)
24. Chen L., Chang Y., *Key Engineering Materials*, 2008, vol. 364–366, pp. 113–116.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.364-366.113>
25. Burke J., Bothe T., Osten W., Hess C., *Proc. SPIE*, 2002, vol. 4778, pp. 312–324. <https://doi.org/10.1117/12.473547>
26. Lin C., He H., Guo H., Chen M., Shi X., Yu T., *Journal of Shanghai University*, 2005, vol. 9(2), pp. 153–158.
<https://doi.org/10.1007/s11741-005-0069-z>
27. Hecht J., Lamprecht K., Merklein M., Galanulis K., Steinbeck J., *Key Engineering Materials*, 2007, vol. 344, pp. 847–853.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.344.847>
28. Yen H., Tsai D., Yang J., *IEEE Trans. Electronics Packaging Manufacturing*, 2006, vol. 29(1), pp. 50–57.
<https://doi.org/10.1109/TEPM.2005.862632>
29. Hui T., Pang G. K., *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 42(7–8), pp. 725–734.
<https://doi.org/10.1007/s00170-008-1639-6>
30. Hong D., Lee H., Kim M. Y., Cho H., Moon J., *Appl. Opt.*, vol. 48(21), pp. 4158–4169. <https://doi.org/10.1364/AO.48.004158>
31. Ambrosini D., Paoletti D., *Opt. Eng.*, 2007, vol. 46(9), 093606. <https://doi.org/10.1117/1.2779023>
32. Gorthi S. S., Rastogi P., *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, vol. 48, iss. 2, pp. 133–140.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.09.001>
33. Dvoynishnikov S. V., Rakhmanov V. V., Kabardin I. K., Meledin V. G., *Measurement*, 2019, vol. 145, pp. 63–70.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.054>
34. Гужов В. И., Солодкин Ю. Н. Анализ точности определения полной разности фаз в целочисленных интерферометрах // Автометрия. 1992. № 6. С. 24–30 [Guzhov V. I., Solodkin Yu. N., Analiz tochnosti opredeleniya polnoi raznosti faz v tselochislennykh interferometrakh, *Avtometriya*, 1992, vol. 6, pp. 24–30 (In Russ.)].
35. Двойнишников С. В., Куликов Д. В., Меледин В. Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного восстановления профиля поверхности трёхмерных объектов сложной формы // Метрология. 2010. № 4. С. 15–27 [Dvoynishnikov, S. V., Kulikov D. V., Meledin V. G., *Measurement Techniques*, 2010, vol. 53(6), pp. 648–656. <https://doi.org/10.1007/s11018-010-9556-0>].
36. Двойнишников С. В., Аникин Ю. А., Кабардин И. К., Куликов Д. В., Меледин В. Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного измерения профиля поверхности крупногабаритных объектов сложной формы // Измерительная техника. 2016. № 1. С. 17–21 [Dvoynishnikov S. V., Anikin Y. A., Kabardin I. K., Kulikov D. V., Meledin V. G., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59(1), pp. 21–27. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-0910-8>].
37. Пат. № 2708940 РФ / С. В. Двойнишников, В. Г. Меледин, И. В. Щепихин, И. К. Кабардин, Д. В. Куликов // Изобретения. Полезные модели. 2019. № 35 [Dvoynishnikov S. V., Meledin V. G., Shchepikhin I. V., Kabardin I. K., Kulikov D. V., RF Patent no. 2708940, *Inventions. Utility Models*, no. 35 (2019)].

Статья поступила в редакцию 07.04.2022; одобрена после рецензирования 27.04.2022; принята к публикации 04.05.2022.
The article was submitted 07.04.2022; approved after 27.04.2022; accepted for publication 04.05.2022.