

Метод фазовой триангуляции со статистической фильтрацией для измерений в условиях случайных аддитивных помех и ограниченного динамического диапазона фотоприёмника

Сергей Владимирович Двойнишников^{1✉}, Владимир Генриевич Меледин²,
Иван Константинович Кабардин³, Виталий Владиславович Рахманов⁴, Владислав Олегович Зуев⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

^{1, 5} Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

¹dv.s@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-0018-7675>

²meledin@itp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3765-342X>

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

⁴rahmanov@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9835-6520>

⁵vlad.zuev.0017@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8317-3278>

Аннотация. Изучено применение оптических методов для измерения параметров трёхмерных объектов. Рассмотрены методы расшифровки фазовых изображений в условиях аддитивных помех и ограниченного динамического диапазона фотоприёмника. Существующие методы расшифровки фазовых изображений вносят нелинейные искажения и систематическую погрешность в результаты измерений в указанных условиях. Предложен исключающий систематические искажения результатов измерений метод фазовой триангуляции со статистической фильтрацией данных для измерения трёхмерного профиля объекта в условиях случайного аддитивного шума и ограниченного динамического диапазона фотоприёмника. Метод основан на адаптивной фильтрации и статистическом анализе распределения интенсивности в зарегистрированных фазовых изображениях. Аналитически исследована погрешность метода расшифровки фазовых изображений с использованием статистической фильтрации данных и пороговой фильтрации. Предложенный метод можно применять для расшифровки данных в системах измерения трёхмерной геометрии, реализующих метод фазовой триангуляции.

Ключевые слова: трёхмерная геометрия, фазовая триангуляция, динамический диапазон, статистический анализ

Для цитирования: Двойнишников С. В., Меледин В. Г., Кабардин И. К., Рахманов В. В., Зуев В. О. Метод фазовой триангуляции со статистической фильтрацией для измерений в условиях случайных аддитивных помех и ограниченного динамического диапазона фотоприёмника // Измерительная техника. 2022. № 6. С. 36–40. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-6-36-40>

Phase triangulation method with statistical filtering for measurements under conditions of random additive noise and a limited dynamic range of a photodetector

Sergey V. Dvoynishnikov^{1✉}, Vladimir G. Meledin², Ivan K. Kabardin³, Vitaly V. Rakhmanov⁴, Vladislav O. Zuev⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Kutateladze Institute of thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

^{1, 5} Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

¹dv.s@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-0018-7675>

²meledin@itp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3765-342X>

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

⁴rahmanov@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9835-6520>

⁵vlad.zuev.0017@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8317-3278>

Abstract. The application of optical methods for measuring the parameters of three-dimensional objects has been studied. Methods for decoding phase images under conditions of additive noise and a limited dynamic range of a photodetector are considered. The existing methods for decoding phase images introduce nonlinear distortions and systematic error into the measurement results under such conditions. A phase triangulation method with statistical data filtering is proposed for measuring the three-dimensional profile of an object under conditions of random additive noise and a limited dynamic range of a photodetector, which excludes systematic distortions of the measurement results. The method is based on adaptive filtering and statistical analysis

of the intensity distribution in the recorded phase images. The error of the method of decoding phase images using statistical data filtering and threshold filtering is analyzed analytically. The proposed method can be used to decode data in systems for measuring three-dimensional geometry that implement the phase triangulation method.

Keywords: 3D-geometry, phase triangulation, dynamic range, statistical analysis

Введение. Задача измерения трёхмерной геометрии объекта актуальна и востребована во многих областях науки и техники. Одними из активно развивающихся и широко применяемых методов являются триангуляционные методы с использованием структурированного освещения [1–3]. Основным преимуществом указанных методов триангуляции является возможность быстрой трёхмерной реконструкции профиля поверхности объекта с высоким разрешением бесконтактным способом по видеоизображениям. Методы фазовой триангуляции [4–6] высокоточные, это обусловлено их устойчивостью к расфокусировке оптической системы источника и приёмника излучения [7–10].

Интенсивное развитие методов фазовой триангуляции свидетельствует о перспективности и возможности широкого применения методов на практике [11–14]. Авторы многих работ используют комбинации различных подходов для улучшения метрологических характеристик измерительных систем [15–17], например, путём разработки оригинальных методов обработки фазовых изображений [18–20]. Существуют работы, описывающие измерения трёхмерного профиля динамических объектов [21], дорожного покрытия [22], обследуемых объектов при внедрении эндоскопических сканеров [23], изделий из листового металла [24], рельсов [25].

В условиях аддитивных помех многие методы расшифровки фазовых изображений неустойчивы: с увеличением помех нелинейно увеличивается погрешность измерений. Для решения указанной проблемы различные авторы применяют подходы на основе пространственной фильтрации фазовых изображений, что наряду с уменьшением погрешности приводит к неконтролируемым искажениям измеряемого профиля.

При измерениях в промышленных условиях важно согласовать параметры источника излучения, светорассеивающих свойств поверхности объекта и параметры фотоприёмника для исключения выхода из динамического диапазона фотоприёмника. При отсутствии согласования параметров источника и приёмника оптического излучения можно использовать устойчивый алгоритм расшифровки фазовых изображений с произвольными сдвигами. Однако в случае аддитивных помех применение таких подходов чрезмерно сузит динамический диапазон фотоприёмника и уменьшит точность измерений.

Цель статьи – разработка метода фазовой триангуляции для измерений в условиях случайных аддитивных помех и ограниченного динамического диапазона фотоприёмника. Метод основан на применении статистического анализа экспериментальных данных и адаптивной фильтрации перед расчётом начального фазового сдвига на изображениях.

Метод фазовой триангуляции. В условиях аддитивных шумов интенсивность на принимаемых фотоприёмником изображениях опишем выражением

$$I(x, y, i) = A(x, y) \{1 + V(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \delta(i)] + R(x, y, i)\}, \\ i \in 1 \dots N,$$

где $I(x, y, i)$ – распределение интенсивности на i -м изображении контролируемого объекта; $A(x, y)$ – распределение фоновой интенсивности; $V(x, y)$ – средняя видность; $\varphi(x, y)$ – искомое распределение разности фаз, кодирующее информацию дальности объекта; $\delta(i)$ – вносимый сдвиг фазы между соседними изображениями структурированной засветки; $R(x, y, i)$ – интенсивность аддитивных шумов, регистрируемых фотоприёмником; N – число сдвигов.

С учётом ограниченности (конечности) динамического диапазона фотоприёмника интенсивность $I_{к.д}(x, y, i)$ на принимаемых изображениях можно выразить как

$$I_{к.д}(x, y, i) = \begin{cases} I_{\max}, & \text{if } [I(x, y, i) > I_{\max}]; \\ I(x, y, i), & \text{if } [I_{\max} \geq I(x, y, i) \geq I_{\min}]; \\ I_{\min}, & \text{if } [I(x, y, i) < I_{\min}]. \end{cases}$$

При расшифровке фазовых изображений по массиву экспериментальных данных, содержащих информацию об интенсивности $I_{к.д}(x, y, i)$ на принимаемых изображениях, будут наблюдаться искажения, вызванные нелинейными искажениями преобразования

$$I(x, y, i) \rightarrow I_{к.д}(x, y, i).$$

Для исключения указанных нелинейных искажений авторы настоящей статьи предлагают следующий метод: для каждого фазового сдвига $\delta(i)$ формировать структурированную засветку несколько раз и далее анализировать полученные распределения интенсивности.

Обозначим распределение интенсивности $\delta(I, j)$, $j = 0 \dots K-1$. При отсутствии или постоянном характере аддитивных помех значения $I_{к.д}(x, y, i, j)$ не зависят от параметра j . При случайных аддитивных помехах значения $I_{к.д}(x, y, i, j)$ колеблются для каждого сочетания (x, y, i) в пределах амплитуды аддитивных помех, принимаемых фотоприёмником.

Значения $I_{к.д}(x, y, i, j)$ отфильтруем по следующему алгоритму. Для каждой комбинации значений (x, y, i) определим минимальное, максимальное и среднее значение интенсивности, зарегистрированное фотоприёмником:

$$I_{к.д}^{\max}(x, y, i) = \max\{I_{к.д}(x, y, i, j)\}, \quad j = 0 \dots K-1;$$

$$I_{k,d}^{\min}(x, y, i) = \min\{I_{k,d}(x, y, i, j)\}, j=0 \dots K-1;$$

$$I_{k,d}^{\text{avg}}(x, y, i) = \frac{\sum I_{k,d}(x, y, i, j)}{K}, j=0 \dots K-1.$$

Для обработки фазовых изображений используем многомерный массив данных $I_{k,d}^*(x, y, i)$ вместо $I_{k,d}(x, y, i, j)$, который сформируем следующим образом: для $\forall(x, y, i)$

$$I_{k,d}^{\text{avg}}(x, y, i) \in \{I_{k,d}^*(x, y, i)\}, \text{ if } \begin{cases} I_{k,d}^{\max}(x, y, i) < I_{\max} \\ I_{k,d}^{\min}(x, y, i) \geq I_{\min} \end{cases}.$$

Далее для расшифровки фазовых изображений можно применять устойчивый метод расшифровки фазовых изображений с произвольными сдвигами. В итоге описанного алгоритма фильтрации данные в трёхмерном контейнере $I_{k,d}(x, y, i)$ могут иметь произвольные пошаговые сдвиги.

Представленный метод позволяет исключить нелинейные искажения, вызванные пороговой фильтрацией экспериментальных данных из-за узкого динамического диапазона фотоприёмника, и, кроме того, снизить уровень

аддитивных помех на анализируемых в конечном итоге данных в $\sqrt{K}$ раз.

Аналитические исследования погрешности метода расшифровки фазовых изображений. Для демонстрации эффективности и работоспособности предложенного метода исследовали погрешности метода расшифровки фазовых изображений на модельных данных.

Выполнили два эксперимента: исследовали погрешности измерений в зависимости от количества фазовых сдвигов при постоянном уровне аддитивного шума, а также от уровня аддитивного шума при постоянном количестве фазовых сдвигов. Предложенный метод на основе адаптивной фильтрации данных сравнили с устойчивым методом расшифровки фазовых изображений с произвольным пошаговым сдвигом. Проанализировали 10 фазовых изображений, принимаемых с одним значением начального фазового сдвига. Количество фазовых сдвигов до фильтрации изменялось в диапазоне 100–2000. В каждом эксперименте сделаны 50 повторений для оценки среднего квадратического отклонения (СКО) измеренной фазы.

На рис. 1 приведены результаты работы метода расшифровки фазовых изображений с пороговой фильтрацией и метода расшифровки с фильтрацией на основе статистического

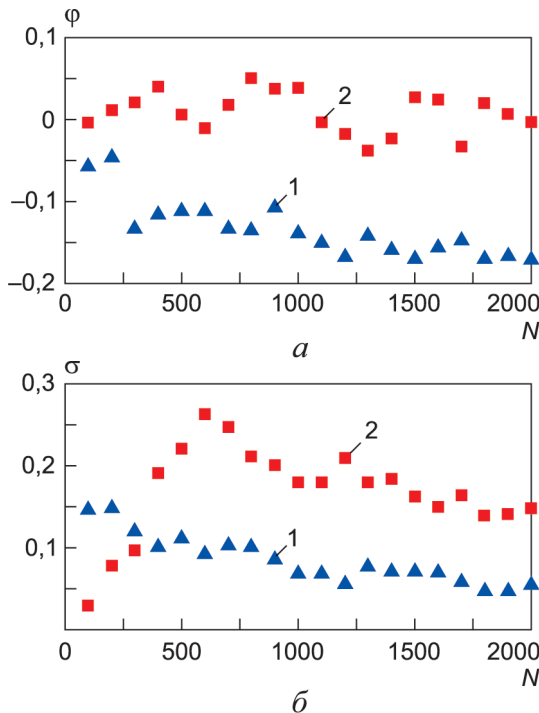


Рис. 1. Зависимости среднего значения φ (а) и СКО σ (б) измеренной фазы от количества N фазовых изображений: 1 – устойчивый метод расшифровки фазовых изображений с пороговой фильтрацией; 2 – устойчивый метод расшифровки фазовых изображений с фильтрацией на основе статистического анализа

Fig. 1. Dependence of the average value φ (a) and the standard deviation σ (b) of the measured phase on the number N of phase images: 1 – a stable method for decoding phase images with threshold filtering; 2 – a stable method for decoding phase images with filtering based on statistical analysis

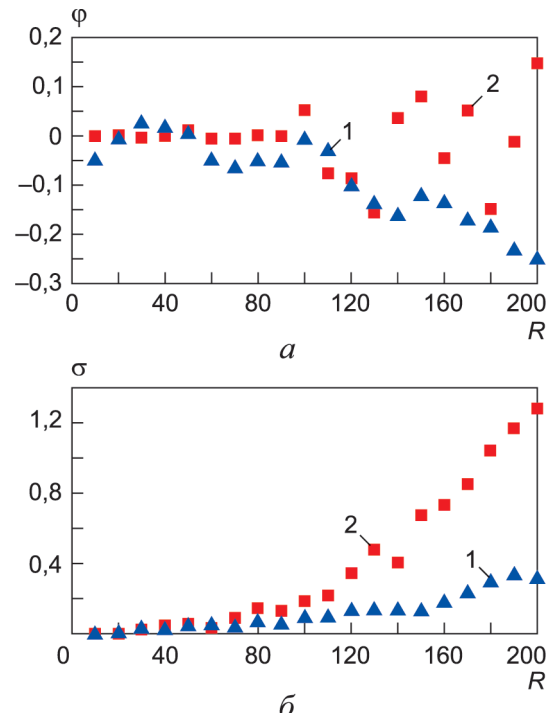


Рис. 2. Зависимости среднего значения φ (а) и СКО σ (б) измеренной фазы от уровня шума R на фазовых изображениях: 1 – устойчивый метод расшифровки фазовых изображений с пороговой фильтрацией; 2 – устойчивый метод расшифровки фазовых изображений с фильтрацией на основе статистического анализа

Fig. 2. Dependence of the average value φ (a) and the standard deviation σ (b) of the measured phase on the noise level R in the phase images: 1 – are a stable method for decoding phase images with threshold filtering; 2 – are a stable method for decoding phase images with filtering based on statistical analysis

анализа в зависимости от количества фазовых сдвигов. Уровень шума 100, максимальная амплитуда регистрируемой интенсивности 255, амплитуда сигнала 300. Указанные величины приведены в условных единицах, соответствующих регистрируемой фотоприёмником интенсивности в диапазоне значений [0...255]. На рис. 1, а представлены зависимости среднего значения измеренной фазы от количества фазовых сдвигов, на рис. 1, б – зависимость СКО измеренной фазы от количества фазовых сдвигов. Метод обработки фазовых изображений с применением статистической фильтрации исключает систематическую погрешность измерений: на рис. 1, а результат работы метода обработки фазовых изображений с применением статистической фильтрации колеблется около нуля, в отличие от результата работы метода расшифровки с пороговой фильтрацией.

На рис. 2 показаны зависимости среднего значения и СКО измеренной фазы от уровня шума на фазовых изображениях. Максимальная амплитуда регистрируемой интенсивности 255, амплитуда сигнала 300, количество фазовых изображений 500. Указанные величины выражены в условных единицах, приведённых к значениям интенсивности, зарегистрированной фотоприёмником. Анализ графиков подтверждает сделанные выше выводы: метод обработки фазовых изображений с применением статистической фильтрации исключает систематическую погрешность измерений при шумах на фазовых изображениях и при рассогласовании динамических диапазонов источника излучения и приёмника.

Представленные данные демонстрируют, что устойчивый метод расшифровки фазовых изображений с пороговой фильтрацией данных, выходящих за пределы динамического диапазона, может давать нелинейные искажения результатов измерения. Погрешность измерений обусловлена искажением сигнала вблизи порогового значения в присутствии шума. Предложенный метод расшифровки с фильтрацией на основе статистического анализа данных лишён указанного недостатка, однако имеет более высокие СКО результатов измерения по сравнению с методом на основе пороговой фильтрации. По-видимому, к увеличению СКО результатов измерения сдвига начальной фазы приводит отсеивание экспериментальных данных при фильтрации.

Практическая реализация метода расшифровки фазовых изображений. Для проверки работоспособности предложенного метода авторы настоящей статьи измеряли трёхмерный профиль модели лопасти гидротурбины с характерными размерами 20×10×10 см (рис. 3, 4). Измерительный комплекс содержал цифровую промышленную камеру DMK 72BUC02 (The Imaging Source, Германия) с матрицей 5 мегапикселей, цифровой проектор, обеспечивающий разрешение проецируемого изображения 1024×768.

Измерительный комплекс калибровали с помощью плоской калибровочной мишени, параллельно сдвигаемой в направлении нормали к плоскости на равные расстояния. Используя полученные результаты измерения калибровочной мишени, строили регрессионную функцию в виде многочлена второй степени, как показано в [26, 27].

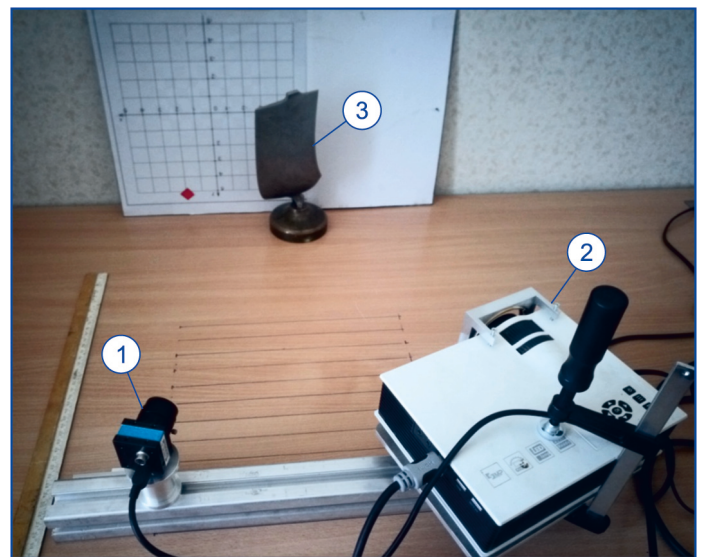


Рис. 3. Измерительный стенд: 1 – фотоприёмник; 2 – источник оптического излучения; 3 – измеряемая модель лопасти гидротурбины

Fig. 3. The measuring stand: 1 – photodetector; 2 – source of optical radiation; 3 – measured model of the hydroturbine blade

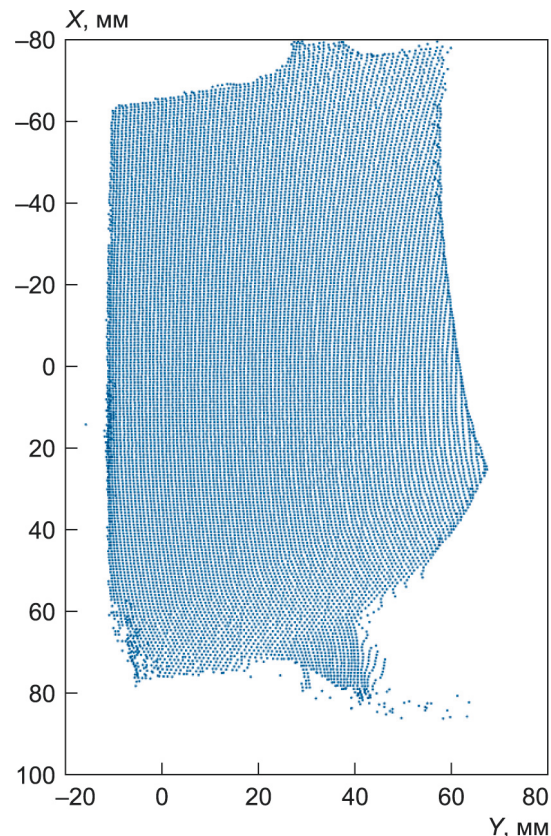


Рис. 4. Результат измерения модели лопасти гидротурбины с характерными размерами 20×10×10 см

Fig. 4. The measurement result of a hydroturbine blade model with dimensions of 20×10×10 cm

СКО результатов измерения составило около 10 мкм, его оценивали с помощью измерения плоской калибровочной мишени, размещённой в измерительном объёме 20×20×20 см. Таким образом, относительная погрешность измерения достигала 0,005 %. Полученные результаты подтвердили работоспособность предложенного метода расшифровки фазовых изображений и очень низкий уровень погрешности. При этом в измерительном комплексе использовали стандартные комплектующие.

Заключение. Предложенный метод расшифровки фазовых изображений позволяет уменьшить погрешность измерения трёхмерной геометрии методами фазовой триангуляции и измерять трёхмерный профиль объектов сложного профиля. Метод очень перспективен для промышленного использования, так как даёт возможность выполнять высокоточные измерения даже в условиях рассогласованных источника и приёмника оптического излучения и произвольных светорассеивающих свойств измеряемой поверхности.

Список источников/References

1. 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>
2. D'Apuzzo N., *Proceedings SPIE*, 2006, vol. 6056, 605605. <https://doi.org/10.1117/12.650123>
3. Zhang S., *Opt. Lasers Eng.*, 2010, vol. 48 (2), pp. 149–158. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASENG.2009.03.008>
4. Gruber M., Hausler G., Simple, robust and accurate phase-measuring triangulation, *Optik*, 1992, vol. 3, pp. 118–122.
5. Chen L., Liang C., Nguyen X., Shu Y., Wu H.-W., *Meas. Sci. Technol.*, 2010, vol. 21(10), 105309. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/10/105309>
6. 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>].
7. 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. 17–22 [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>].
8. Двойнишников С. В., Меледин В. Г., Главный В. Г., Наумов И. В., Чубов А. С. Оценка оптимальной частоты пространственной модуляции излучения 3D-измерений // Измерительная техника. 2015. № 5. С. 24–27 [Dvoynishnikov S. V., Meledin V. G., Glavnyi V. G., Naumov I. V., Chubov A. S., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58(5), pp. 506–511. <https://doi.org/10.1007/S11018-015-0745-8>].

9. 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>
10. Lv S., Jiang M., Su C., Zhang L., Zhang F., Sui Q., Jia L., *Sensors*, 2021, vol. 21, 4463. <https://doi.org/10.3390/s21134463>
11. Wankhede P., Kodey S., Kurra S., Radhika S., *Measurement*, 2022, vol. 187, 110273. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110273>
12. Rudyk A., Semenov A., Kryvinska N., Semenova O., *Measurement*, 2022, vol. 187, 110271. <http://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110271>
13. Jiang Y., Wang S., Qin H., Li B., Li Q., *Measurement*, 2021, vol. 186, 110207. <https://doi.org/10.1088/1361-6501%2Fac1b41>
14. Dong Y., Li Z., Zhu L., Zhang X., *Measurement*, 2021, vol. 186, 110199. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110199>
15. Guo F., Yang B., Zheng W., Liu S., *Measurement*, 2021, vol. 186, 110165. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110165>
16. Fan J., Feng Y., Mo J., Wang S., Liang Q., *Measurement*, 2021, vol. 185, 110029. <http://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110029>
17. Wang H., Ma J., Yang H., Sun F., Wei Y., Wang L., *Measurement*, 2021, vol. 185, 110003. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110003>
18. Shi B., Ma Z., Ni X., Liu J., Liu H., *Measurement*, 2021, vol. 185, 109938. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109938>
19. Zhang Y., Fan N., Wu Y., Wu G., Luo H., Yan J., Yang S., Liu F., *Measurement*, 2021, vol. 171, 108762. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108762>
20. Luhmann T., *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens*, 2010, vol. 65(6), pp. 558–569. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2010.06.003>
21. Li B., An Y., Capelleri D., Xu J., Zhang S., *Int. J. Intell. Robot. Appl.*, 2017, vol. 1 (1), pp. 86–103. <https://doi.org/10.1007/s41315-016-0001-7>
22. Matthias S., Kästner M., Reithmeier E., *Measurement*, 2015, vol. 73, pp. 239–246. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2015.05.024>
23. Chu C., Yang H., Wang L., *Measurement*, 2019, vol. 145, pp. 410–418. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2019.02.058>
24. Koutecký T., Paloušek D., Brandejs J., *Measurement*, 2016, vol. 94, pp. 60–70. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2016.07.067>
25. Cao X., Xie W., Ahmed S. M., Li C. R., *Measurement*, 2020, vol. 159, 107771. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107771>
26. Пат. № 2433372 РФ / Двойнишников С. В., Меледин В. Г. // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 31 [Dvoynishnikov S. V., Meledin V. G., RF Patent no. 2433372, *Byull. Izobret.*, no. 31 (2011)].
27. Пат. № 2439489 РФ / Двойнишников С. В., Меледин В. Г. // Изобретения. Полезные модели. 2012. № 1 [Dvoynishnikov S. V., Meledin V. G., RF Patent no. 2439489, *Byull. Izobret.*, no. 1 (2012)].

Статья поступила в редакцию 01.04.2022; одобрена после рецензирования 19.04.2022; принята к публикации 26.04.2022.
The article was submitted 01.04.2022 approved after 19.04.2022; accepted for publication 26.04.2022.