Теплофизика и аэромеханика, 2023, том 30, № 1

УДК 681.786.4

Измерение геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов*

В.О. Зуев[1,2*], С.В. Двойнишников[1], В.Г. Меледин[1], В.В. Рахманов[1], О.Ю. Садбаков[1], И.К. Кабардин[1]

[1]*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

[2]*Новосибирский государственный университет*

E-mail: vlad.zuev.0017@mail.ru

Изучена проблема измерения геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов. Для проведения данных исследований разработан алгоритм измерения и калибровки на основе указанного метода. Кроме того, для учета отражающих свойств наледи, условий внешнего освещения и обеспечения минимальной погрешности измерения геометрических параметров наледи разработаны программные комплексы для контроля качества работы измерительной системы с текущими параметрами и для расчета геометрических параметров наледи, а также программно-аппаратный комплекс для измерения геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов. Измерительная система настроена для измерительного объема с характерным размером (100×100×60) мм. Достигнута погрешность измерения, равная 12 мкм. Проведены эксперименты по измерению геометрических параметров наледи, образованной на цилиндрической поверхности. Восстановлены значения локальной толщины наледи и статистическое значение толщины, составляющее 1,6 мм. Разработанные технологии могут быть использованы в экспериментах на аэродинамическом стенде по исследованию процессов обледенения, нацеленных на разработку методов борьбы с обледенением в различных областях промышленности.

Ключевые слова: наледь, фазовая триангуляция, преломление оптических сигналов.

Введение

Существует широкий спектр научных исследований в области измерения трехмерной конфигурации объекта [1 – 3]. Данные исследования направлены как на повышение метрологических характеристик, так и на решение узкоспециализированных задач [4, 5]. Примером такой задачи является измерение геометрических параметров наледи на аэродинамическом стенде по исследованию процессов обледенения [6, 7], а ее решение позволит разработать методы борьбы с обледенением в различных областях промышленности, таких как ветроэнергетика, электроэнергетика, авиация.

Научно-техническая проблематика задачи измерения геометрических параметров наледи обусловлена следующей совокупностью факторов:

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00205, https://rscf.ru/project/21-19-00205/.

© **Зуев В.О., Двойнишников С.В., Меледин В.Н., Рахманов В.В., Садбаков О.Ю., Кабардин И.К., 2023**

— необходимостью обеспечения высокой точности измерения;

— необходимостью учета отражающих свойств наледи;

— проведением измерений в условиях преломления оптических сигналов (исследуемый объект помещен в изолированный объем с моделируемыми условиями);

— необходимостью разработки метода расчета геометрических параметров наледи.

Для решения задачи измерения геометрических параметров наледи в первую очередь необходимо выбрать технологию измерения формы объекта. Так как применение контактных методов может нарушить моделируемые условия обледенения, то наиболее перспективным решением является использование бесконтактных оптических технологий. Среди оптических методов измерения трехмерных особенностей объекта существенное развитие и широкое применение получил метод фазовой триангуляции [8 – 10]. Он обеспечивает высокую точность и скорость измерения и обладает простотой использования, что определяет перспективность его адаптации для исследования образования наледи в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов.

Настоящая работа посвящена разработке программно-аппаратного комплекса для измерения геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов.

Адаптация метода фазовой триангуляции

Принцип работы триангуляционных методов с использованием структурированного освещения основан на проецировании источником освещения на объект специальной структурированной засветки, которая регистрируется фотоприемником. Наблюдаемые искажения структурированной засветки кодируют информацию о рельефе измеряемой поверхности. Устройство структурированной засветки предполагает уникальное кодирование областей объекта. Анализируя области объекта с одинаковым кодом на изображениях источника и приемника излучения и зная их взаимное расположение, можно вычислить углы источника (∠BCA) и приемника (∠BAC) излучения (рис. 1). На основе известных данных о расстоянии между источником и приемником излучения (CA) восстанавливается расстояние до закодированной области объекта. В методе фазовой триангуляции в качестве структурированной засветки используется изображение с параллельными полосами с гармоническим изменением интенсивности, а кодирование происходит с помощью фазы синусоиды.

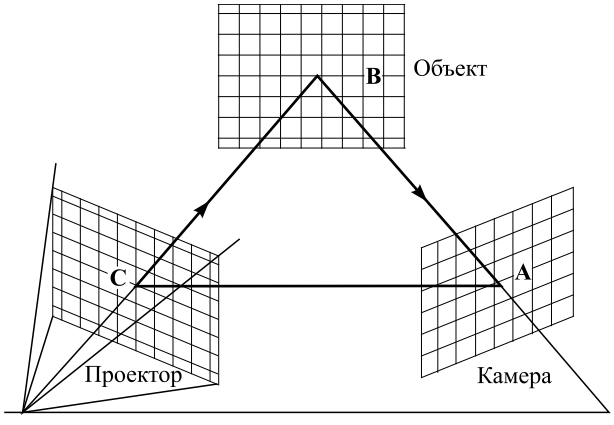

Рис. 1. Схема работы триангуляционных методов с использованием структурированного освещения.

Для измерения геометрических параметров наледи в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов требуется адаптация метода фазовой триангуляции, которая выражается в подборе параметров измерительной системы, обеспечивающих достижение минимальной погрешности измерения формы наледи [8, 11], и учете нарушения прямолинейности траектории луча при распространении по тракту проектор – объект – фотоприемник, вызванного наличием пространственного изолятора экспериментальной области в виде прозрачных стенок:

$$n_1 \sin \varepsilon = n_2 \sin \varepsilon', \tag{1}$$

где ε — угол падения, ε'— угол преломления, n_1 — показатель преломления первой среды, n_2 — показатель преломления второй среды.

Для подбора оптимальных параметров метода фазовой триангуляции (частоты фазовой модуляции) и функциональных оптических элементов (фотоприемника и проектора), обеспечивающих минимальную погрешность определения формы наледи, разработан специальный программный комплекс (набор из двух компьютерных программ). Этот комплекс рассчитывает количественные оценки качества работы измерительной системы с текущими параметрами, и на их основе оператор делает вывод о применимости текущих параметров. В качестве количественных оценок выступают уровень шума в результатах расшифровки фазовых изображений и погрешность измерения трехмерных характеристик плоского объекта (рис. 2). Для расчета последней выполняется аппроксимация измеренного набора точек плоскостью с последующим расчетом стандартного отклонения точек от аппроксимирующей плоскости:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \overline{d})^2}{n}}, \tag{2}$$

где d_i — расстояние от точки (x_i, y_i, z_i) до аппроксимирующей плоскости, $\overline{d}$ — среднее расстояние точек до аппроксимирующей плоскости, n — количество точек.

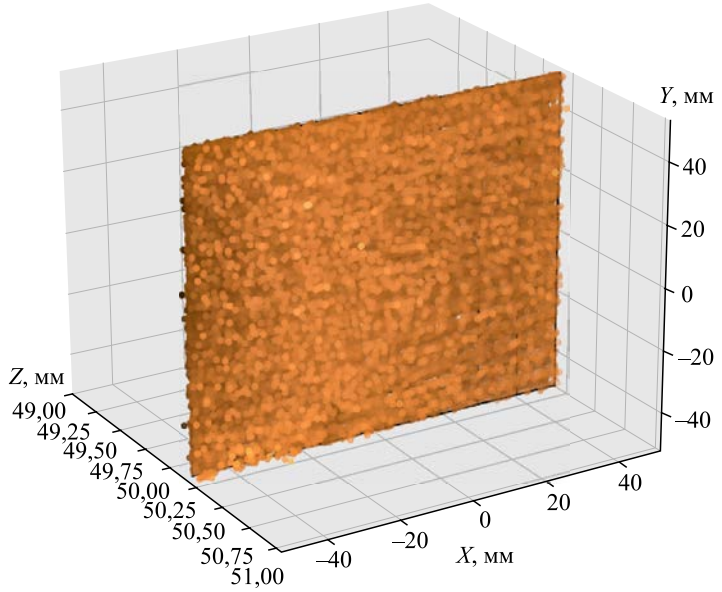

Рис. 2. Результат измерения плоской поверхности в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов. Максимальное отклонение равно 0,146 мм, σ = 0,012 мм.

Для учета нарушения прямолинейности траектории луча при распространении по тракту проектор – объект – фотоприемник разработан специальный алгоритм калибровки и определения геометрии объекта на основе метода фазовой триангуляции, который используется следующим образом. Калибровочный объект перемещается внутри экспериментального (изолирующего) объема, при этом устанавливается взаимооднозначное соответствие между координатами изображения фотоприемника, регистрируемой фазой модулирующей синусоиды и трехмерными координатами: $(x_c, y_c, \varphi) \leftrightarrow (X, Y, Z)$ [12]. В процессе измерения формы объекта для каждого пикселя фотоприемника (x_c, y_c) по значению восстановленной фазы модулирующего сигнала φ^* однозначно определяются трехмерные координаты объекта (X^*, Y^*, Z^*).

Расчет геометрических параметров наледи

Для расчета геометрических параметров наледи по результатам измерения пространственных характеристик объекта (до и после обледенения) методом фазовой триангуляции разработан программный комплекс, который работает по описанному ниже алгоритму.

1. Восстановление полигональной поверхности объекта (до и после обледенения).
2. Адаптивная фильтрация полигонов.
3. Построение карты нормалей.
4. Вычисление локальной толщины наледи.
5. Проведение статистического анализа толщины ледяного нароста.

Восстановление полигональной поверхности объекта выполняется с помощью его измеренных точек, структурированных по изображению фотоприемника. Т. е. для каждой измеренной точки (X, Y, Z) взаимооднозначно определяются координаты изображения фотоприемника (x_c, y_c). Затем для каждой координаты изображения фотоприемника (x_c, y_c) восстанавливаются два полигона:

$$\text{Polygon}_1 = \{v_1, v_2, v_3\}, \tag{3}$$

$$\text{Polygon}_2 = \{v_1, v_3, v_4\}, \tag{4}$$

где v_1 — измеренная точка с координатами изображения фотоприемника (x_c, y_c), v_2 — измеренная точка с координатами изображения фотоприемника (x_{c+1}, y_c), v_3 — измеренная точка с координатами изображения фотоприемника (x_{c+1}, y_{c+1}), v_4 — измеренная точка с координатами изображения фотоприемника (x_c, y_{c+1}).

Вычисление локальной толщины наледи происходит по следующему алгоритму: для каждого полигона поверхности объекта до обледенения находится ближайший по направлению нормали полигон поверхности объекта после обледенения. В качестве численного значения локальной толщины ледяного нароста принимается расстояние между найденными полигонами.

Тестирование программно-аппаратного комплекса для измерения геометрических параметров наледи

Разработанный программно-аппаратный комплекс для измерения геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов включает в себя аппаратную часть измерительной системы,

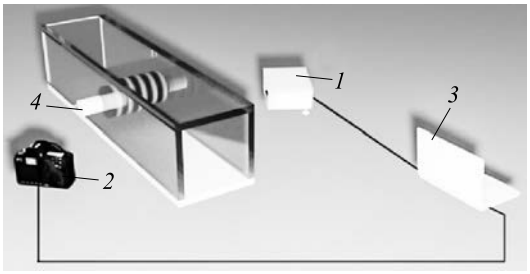

Рис. 3. Система измерения геометрических параметров наледи.
1 — проектор, *2* — фотоприемник, *3* — компьютер, *4* — объект.

состоящую из фотоприемника Imaging Source DMK 33GX264 с объективом Imaging Source TCL 5026 5MP, цифрового проектора Excelvan CL720 с разрешением 1280×800 и световым потоком 3000 лм с доработанной оптической системой для формирования резкого изображения на расстоянии 60 – 80 см.

Авторами было проведено тестирование разработанного программно-аппаратного комплекса, целью которого являлась диагностика геометрических параметров наледи, формирующейся на экспериментальной уменьшенной модели ветроэнергетической установки, помещенной в объем с моделируемыми условиями обледенения (рис. 3). В качестве измерительного объема выступала труба из оргстекла с поперечным сечением 200×200 мм и с толщиной стенок 20 мм. Характерный размер измерительного объема составил 100×100×60 мм.

Далее была выполнена настройка параметров измерительной системы, в ходе которой оптимизировались частота фазовой модуляции и параметры оптической системы: взаимное расположение источника и приемника оптического излучения, их фокусные расстояния, длительность экспозиции и усиление аналогового сигнала. В результате расстояние от источника освещения до объекта составило 60 см, от фотоприемника до объекта — 125 см. Угол между оптическими осями источника и приемника оптического излучения равнялся 70°.

В ходе исследований была проведена калибровка измерительной системы в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов в соответствии с разработанным алгоритмом и достигнута погрешность определения трехмерных особенностей плоского объекта 12 мкм.

Наконец, были выполнены эксперименты по обледенению цилиндрической поверхности: измерена форма экспериментального объекта до и после обледенения. На основе полученных данных был проведен расчет геометрических параметров наледи: вычислены значения локальной толщины и рассчитаны статистические данные толщины ледяного нароста. Характерная толщина ледяного нароста составила 1,6 мм (рис. 4).

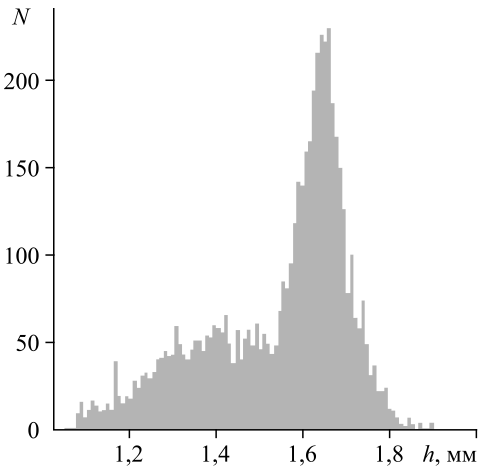

Рис. 4. Гистограмма, построенная по всем значениям толщины ледяного нароста, вычисленным для каждой области исходной поверхности объекта.

Заключение

В представленной работе решена проблема измерения геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов. Для учета нарушения прямолинейного распространения излучения и проведения измерений в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов разработан алгоритм измерения и калибровки на основе фазовой триангуляции. Для учета отражающих свойств наледи, условий внешнего освещения и обеспечения минимальной погрешности измерения геометрических параметров наледи разработан программный комплекс для подбора оптимальных параметров измерительной системы. Также разработан программный комплекс для расчета геометрических параметров наледи по результатам определения формы объекта методом фазовой триангуляции. Кроме того, предложен программно-аппаратный комплекс для измерения геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов. Достигнута погрешность измерения 12 мкм. Показана перспективность использования разработанных алгоритмов и технологий в задаче измерения геометрических параметров наледи в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов.

Список литературы

1. **Dvoynishnikov S.V., Kabardin I.K., Meledin V.G.** Advanced phase triangulation methods for 3D shape measurements in scientific and industrial applications // Machine Vision and Navigation. Springer, 2020. P. 675–709.
2. **Cobelli P.J., Maurel A., Pagneux V., Petitjeans P.** Global measurement of water waves by Fourier transform profilometry // Experiments in Fluids. 2009. Vol. 46, No. 6. P. 1037–1047.
3. **Zhang Q., Su X.** An optical measurement of vortex shape at a free surface // Optics & Laser Technology. 2002. Vol. 34, No. 2. P. 107–113.
4. **Меледин В.Г.** Оптоэлектронные информационные системы для науки и промышленности // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014. Т. 5, № 1. С. 3–12.
5. **Чугуй Ю.В.** Трёхмерные оптико-электронные измерительные системы и лазерные технологии для научных и промышленных применений // Автометрия. 2015. Т. 51, № 4. С. 76–91.
6. **Gao L., Veerakumar R., Liu Y., Hu H.** Quantification of the 3D shapes of the ice structures accreted on a wind turbine airfoil model // J. Visualization. 2019. Vol. 22, No. 4. P. 661–667.
7. **Lee S., Broeren A.P., Addy H.E., Sills R., Pifer E.M.** Development of 3D ice accretion measurement method // Atmospheric and Space Environments Conf. NASA TM-2012-217702. 2012. AIAA Paper. No. 2012-2938.
8. **Gorthi S.S., Rastogi P.** Fringe projection techniques: Whither we are? // Optics and Lasers in Engng. 2010. Vol. 48. P. 133–140.ё
9. **Zhang S.** Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques // Optics and Lasers in Engng. 2010. Vol. 48, No. 2. P. 149–158.
10. **Gruber M., Hausler G.** Simple, robust and accurate phase-measuring triangulation // Optik. 1992. Vol. 89. P. 118–122.
11. **Dvoynishnikov S.V., Rakhmanov V.V., Kabardin I.K., Meledin V.G.** Phase triangulation method with spatial modulation frequency optimization // Measurement. 2019. Vol. 145. P. 63–70.
12. **Пат. РФ 2433372, МПК[51] G01B 11/24.** Способ бесконтактного измерения линейных размеров трехмерных объектов / Двойнишников С.В., Меледин В.Г.; патентообладатели ИТ СО РАН, ОАО «ИОИТ». № 2009134025/28; заявл. 10.09. 2009; опубл. 20.03.2011, Бюл. № 8.

Статья поступила в редакцию 26 июня 2022 г.,
после доработки — 12 июля 2022 г.,
принята к публикации 8 декабря 2022 г.