

Цифровая голография частиц и ее применения

В. В. Дёмин, И. Г. Половцев

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

В работе представлена ДНС-технология (ДНС — Digital Holographic Camera), включающая запись цифровой голографии объема среды, содержащей частицы, восстановление изображений частиц, определение их размеров, форм, их распознавание, а также определение их местоположения и динамики движения. Представлены аппаратные реализации технологии и применения, показывающие уникальные возможности in-situ исследований планктона и морских частиц, 3D картирования неоднородностей и исследования пробоя в оптических средах.

Ключевые слова: Цифровая голография, Подводная цифровая голография частиц, Цифровая голография оптических неоднородностей.

Цитирование: Дёмин, В. В. Цифровая голография частиц и ее применения / В. В. Дёмин, И. Г. Половцев // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 15–19.

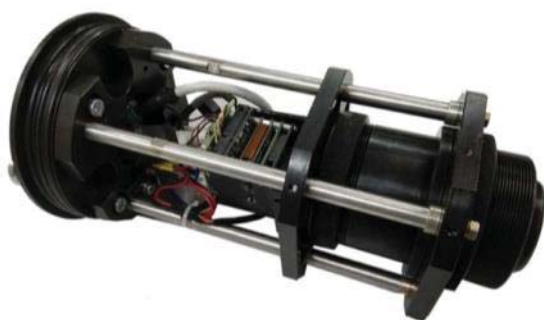
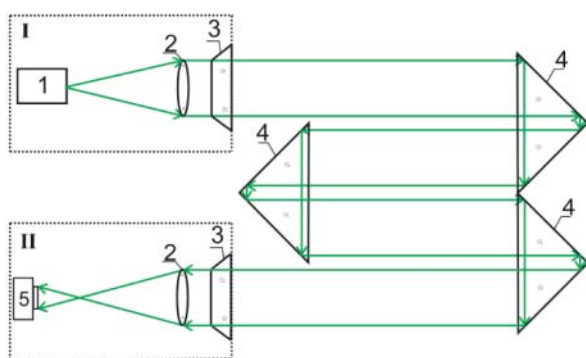
Введение

Голография применяется для исследования частиц различного происхождения в различных средах (аэрозоли, планктон, эритроциты, капли в распыле топливных форсунок и т.п.) [1-4]. Использование ПЗС (КМОП) камеры позволяет записывать голограмму в цифровом виде (в виде файла) и восстанавливать изображения частиц численно, что обеспечивает дополнительные возможности – передачу голограммы по линиям связи при исследовании труднодоступных или удаленных объектов, предварительную численную обработку голограммы и улучшение качества восстановленного изображения, создание видео на базе голографических данных. При этом цифровая голограмма представляет собой двумерный массив дискретных квантованных данных распределения интенсивности картины интерференции опорной и предметной волн, что требует определенных алгоритмов обработки. В работе рассматриваются эти особенности, описывается ДНС технология (Digital Holographic Camera) [4], включающая запись цифровой голографии объема среды, содержащей частицы, и получение из голограммы полной информации о частицах. Демонстрируются экспериментальные результаты применения ДНС технологии и ее аппаратно-программных реализаций для исследования планктона в среде обитания, 3D картирования неоднородностей в оптических средах, исследования процесса пробоя в монокристалле [4-6].

1. Аппаратные реализации ДНС технологии

Нами разработаны, изготовлены и апробированы в натуральных и производственных условиях несколько аппаратно-программных реализаций ДНС технологии [4-6]. Все они построены по осевой схеме, когда исследуемый объем среды с частицами просвечивается лазерным пучком, излучение, рассеянное на частицах, является предметной волной, а излучение, прошедшее

без рассеяния — опорной волной. На рис. 1 представлена модификация осевой схемы, когда пучок, просвечивающий среду, организован в «сложенном варианте» при помощи призм. Это позволило существенно уменьшить габариты камеры, сохранив при этом протяженность исследуемого объема (глубину регистрируемой сцены) 700 мм, что при диаметре освещающего пучка 40 мм обеспечивает регистрацию за одну экспозицию голограммы объема около 0,5 л. Размещение освещающего и регистрирующего модулей в прочных герметичных корпусах позволяет использование данной камеры до глубины 600 м. Разработан также вариант ДНС (рис. 2а) с тремя лазерами: зеленый (аттракторный свет для фотостимуляции активности планктона), красный (для регистрации голограммы) и фиолетовый (для исследования люминесцирующих водорослей). Эта модификация ДНС предназначена для изучения поведенческих реакций планктона на загрязнение среды обитания.

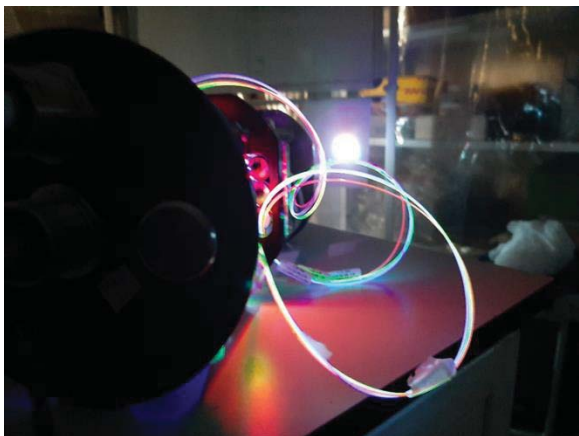


а) I — освещающий модуль; II — регистрирующий модуль;
1 — лазер; 2 — объективы; 3 — иллюминаторы;
4 — призмы; 5 — CMOS камера

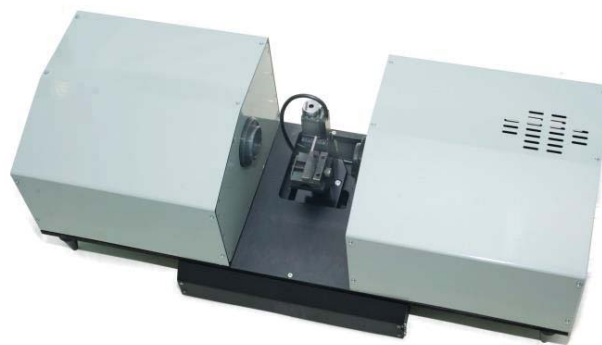
б) фотография ДНС в сборе, модули в герметичных прочных корпусах

Рис. 1. Оптическая схема и фотография погружаемой ДНС

На рис. 2б приведена модификация ДНС, предназначенная для 3D картирования неоднородностей и изучения пробоя в монокристалле $ZnGeP_2$. для последующего выбора бездефектных областей при раскрое на рабочие элементы, а также для уточнения процесса выращивания монокристалла. Отметим, что здесь использована классическая (не «сложенная») осевая схема.



а) трехдлинноволновая лазерная волоконная система для ДНС- выявления поведенческих реакций



б) настольная ДНС для диагностики оптических сред и монокристаллов

Рис. 2. Пример аппаратных реализаций ДНС

2. ДНС исследования планктона и морских частиц

В настоящее время непрерывный мониторинг свойств океана при помощи различных сенсоров (морская сенсорика) является как никогда актуальным и ответственным процессом. Планктон мирового океана- начало пищевой цепочки, поэтому его состояние является важным фактором сохранения биоразнообразия, а использование его в естественной среде обитания в качестве биоиндикатора позволяет на ранних стадиях определить устойчивость этой среды к различным факторам, связанным, например, с антропогенным воздействием. Представленные в статье ДНС сенсоры, создаваемые в ТГУ, предназначены для гидробиологических измерений *in situ* с получением информации в реальном времени с использованием современных каналов связи, обработки больших данных, нейронных сетей и машинного обучения.

Представленные в работе цифровые голографические сенсоры планктона и морских частиц, позволяющие выполнять детектирование, измерение геометрических параметров, распознавание и анализ двигательной активности планктонных частиц, являются новым (с точки зрения методики измерений) измерительным средством морской сенсорики, и ориентированы на решение следующих задач экологического мониторинга:

- *in situ* построение распределения планктонной концентрации по глубине, а также классификация планктона по таксономическим признакам с целью экологического мониторинга, идентификации биоресурсов, океанологических, гидробиологических исследований с получением результата в реальном времени в режиме непрерывного потока данных,

- *in situ* анализ поведения планктонных частиц с целью раннего биотестирования в акватории опасных объектов (атомных станций, нефтяных платформ, газопроводов и т.п.) в мониторинговом режиме;

– *in situ* анализ взвешенных частиц для построения гидрологических моделей переноса частиц твердой взвеси,

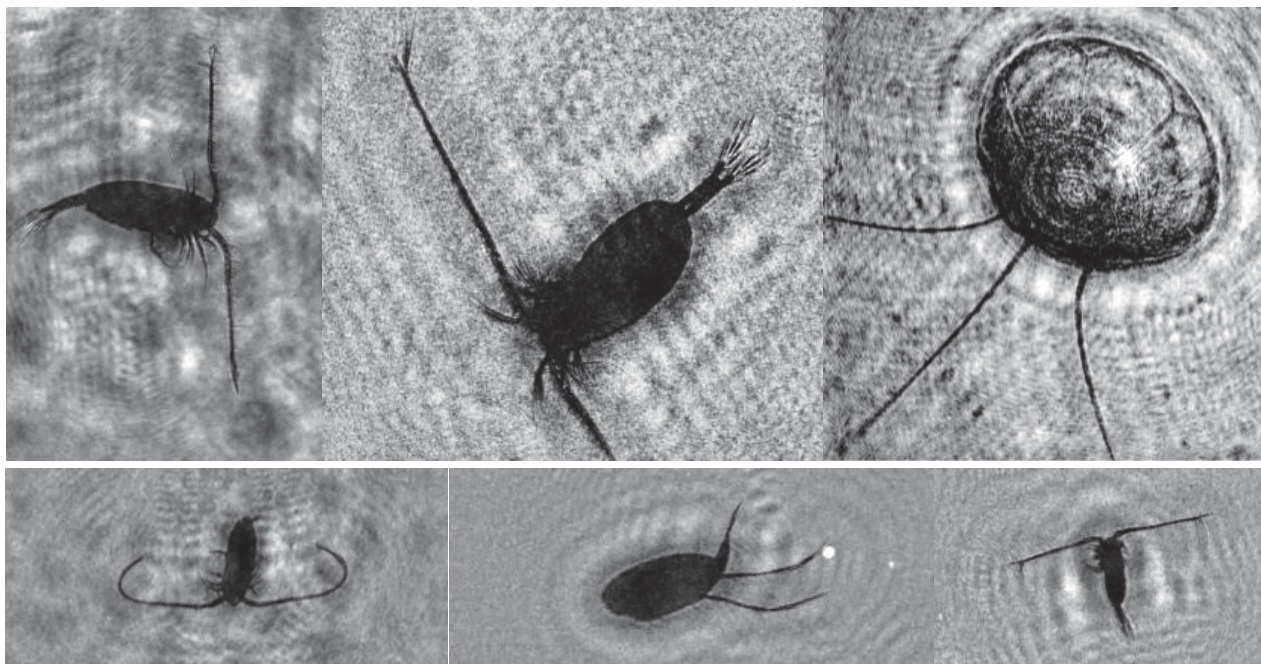


Рис. 3. Голографические изображения планктонных частиц, полученные в натуральных условиях

Погружаемые ДНС использованы для измерений в нескольких экспедициях в Черном море, в Кольском заливе, в Карском море, на озере Байкал. В работе приведены экспериментальные результаты натуральных измерений. Примеры голографических изображений планктонных особей, полученных *in situ* при помощи погружаемой ДНС, приведены на рис. 3.

3. Исследования оптических сред

Объемные дефекты (включения по оптической терминологии) в нелинейных оптических материалах, например, монокристаллах $ZnGeP_2$, существенно сказываются на оптических свойствах: показатель преломления, коэффициент поглощения, оптическая прочность. С этой точки зрения обнаружение в материале объемных включений и указание точного их расположения в значительном объеме материала (около 500 мм^3) является аларм-сигналом нарушения оптических свойств. В данной работе представлены результаты контроля качества монокристаллического материала $ZnGeP_2$ в производственном процессе с применением цифровой голографии (рис. 2б). Приведены также голографические исследования процесса оптического пробоя в монокристалле.

Заключение

Выполненные исследования показали уникальные возможности цифровой голографии частиц, при *in situ* исследованиях планктона, а использование разработанных погружаемых камер в натуральных условиях позволили уточнить особенности их применения и диапазоны

измеряемых параметров планктона и морских частиц. В исследованиях оптических сред показано, что цифровая голография частиц полезна не только при выборе монокристаллических областей, обеспечивающих максимально возможную эффективность нелинейно-параметрического преобразования частоты лазерного излучения, но и для прогнозирования оптической прочности нелинейных элементов.

Благодарность

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Список источников

- [1] **Fugal J.P., Shaw R.A.** Cloud particle size distributions measured with an airborne digital in-line holographic instrument // *Atmos. Meas. Tech.*— 2009.— Vol. 2.— № 1.— P. 259–271.
- [2] **Watson J.** Submersible digital holographic cameras and their application to marine science // *Opt. Eng.*— 2011.— Vol. 50.— № 9.— P. 091313–1–091313–5.
- [3] **Kumar V., Khan G.S., Shakher C.** Phase contrast imaging of red blood cells using digital holographic interferometric microscope // *Proc. SPIE.*— 2017.— Vol. 10453.— P. 104532T–1 – 104532T–7.
- [4] **Dyomin V. et al.** Holography of particles for diagnostics tasks [Invited] // *Appl. Opt.*— 2019.— Vol. 58.— № 34.— P. G300–G310.
- [5] **Dyomin V. et al.** Underwater Holographic Sensor for Plankton Studies In Situ including Accompanying Measurements // *Sensors.*— 2021.— Vol. 21.— № 4863.— P. 1–19.
- [6] **Dyomin V.V. et al.** Visualization of volumetric defects and dynamic processes in crystals by digital IR—holography // *Appl. Opt.* — 2021. — Vol. 60.— № 4.— P. A296–A305.

Particles digital holography and its applications

V. V. Dyomin, I. G. Polovtsev

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

The paper presents DHC-technology (DHC – Digital Holographic Camera), which includes recording digital hologram of the medium volume containing particles, reconstruction images of particles, determining their sizes, shapes, their recognition, as well as determining their location and motion dynamics. Hardware implementations of the technology and its applications are presented, showing the unique capabilities of in situ studies of plankton and marine particles, 3D mapping of inhomogeneities and study of breakdown in optical media.

Keywords: Digital holography, Underwater digital holography of particles, Digital holography of optical heterogeneities.