

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-854-858

УДК 535.4, 532.2, 535.8, 62-529

Автоматическое распознавание структур в полупрозрачных движущихся объектах на основе голографической муаровой интерферометрии (краткое сообщение)

Константин Андреевич Ляхов¹✉, Василий Аркадьевич Григорьев²,
Елизавета Георгиевна Циплакова³

¹ Математический институт имени В.А. Стеклова РАН, Москва, 119991, Российская Федерация

² Общество с ограниченной ответственностью «Митлаз-Р», Московская обл., г.о. Солнечногорск, 147552, Российская Федерация

³ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ Lyakhov2000@yahoo.com✉, <https://orcid.org/0000-0003-2023-5811>

² vagrigroriev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7662-5769>

³ e.tsiplakova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1229-4793>

Аннотация

Представлена новая принципиальная схема для автоматического распознавания формы и взаимного расположения включений в движущихся полупрозрачных объектах. Введен новый критерий для автоматической идентификации структур (их локализации) на основе анализа интерференционной картины, спроецированной на поверхности ПЗС-матрицы, которая является элементом схемы оптического коррелятора на основе конфокального голографического томографа. Результаты данной работы могут быть полезны специалистам в области неразрушающего контроля и найти применение в соответствующих областях.

Ключевые слова

неразрушающий контроль, лазерная томография, ПЗС-матрица, интерферометрия, голографический коррелятор

Ссылка для цитирования: Ляхов К.А., Григорьев В.А., Циплакова Е.Г. Автоматическое распознавание структур в полупрозрачных движущихся объектах на основе голографической муаровой интерферометрии (краткое сообщение) // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 5. С. 854–858. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-854-858

Automatic recognition of internal structures in translucent objects based on hologram-moire interferometry

Konstantin A. Lyakhov¹✉, Vasily A. Grigoriev², Elizaveta G. Tsiplakova³

¹ Steklov Mathematical Institute, Moscow, 119991, Russian Federation

² Mitlas-R Ltd, Solnechnogorsk, 147552, Russian Federation

³ ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ Lyakhov2000@yahoo.com✉, <https://orcid.org/0000-0003-2023-5811>

² vagrigroriev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7662-5769>

³ e.tsiplakova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1229-4793>

Abstract

A new principal optical scheme for automatic recognition of the shape and relative position of inclusions in moving translucent objects is presented. A new criterion for automatic identification of structures (their localization) based on the analysis of the interference pattern projected on the surface of a CCD matrix, which is an element of the proposed scheme of an optical correlator based on the confocal laser tomograph, has been introduced. The results of this work may be of interest to the specialists in the field of non-destructive control; it can find application in the relevant fields.

Keywords

non-destructive control, laser tomography, CCD, interferometry, holographic correlator

For citation: Lyakhov K.A., Grigoriev V.A., Tsiplakova E.G. Automatic recognition of internal structures in translucent objects based on hologram-moire interferometry. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 854–858 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-854-858**Введение**

В настоящее время активно развиваются методы ранней диагностики различных заболеваний и интраоперационной поддержки принятия решений [1], а также контроля качества в сельском хозяйстве. В связи с этим важно создание новых передовых средств неразрушающего контроля. Особенность контроля объектов в полупрозрачных средах — создание методов оптической диагностики с пространственным разрешением порядка десятых долей миллиметра. Результат исследований — обнаружение и распознавание требуемого признака объекта по заранее заданному критерию. Таким образом, наиболее подходящими методами для такой диагностики являются методы лазерной томографии [2, 3] с использованием современных аппаратно-программных средств для получения и обработки оптических изображений. В настоящей работе предложена принципиальная схема распознавания движущихся объектов на основе конфокального голографического томографа, принцип действия которого основан на голограммно-муаровой интерферометрии для полупрозрачных объектов [4, 5]. Установка имеет некоторые сходства со схемой сопряженного фурье-коррелятора, предложенного в работе [6], заключающиеся в использовании эталонного модулятора света для формирования эталонных микроголограмм Фурье в объеме голографического диска и в использовании печи для их фиксации.

В отличие от основной массы работ по детектированию и распознаванию объектов в оптических корреляторах, где предполагается широкое применение нейронных сетей на основе цифровой обработки сигналов, предлагаемый метод детектирования структур в движущихся полупрозрачных объектах на них не основан и не предполагает цифровую обработку сигналов. За счет отсутствия фазы конвертации аналогового сигнала в цифровой ожидается значительное ускорение автоматической идентификации структур в полупрозрачных движущихся объектах.

Принцип распознавания

Техническая реализации процесса распознавания заключается в последовательном переборе микроголограмм Фурье эталонных объектов, записанных на голографическом диске. Перебор осуществляется с помощью вращения диска с некоторой угловой частотой ω . Распознавание осуществляется при помощи сравнения дифракционных картин, соответствующих рассеянию на микроголограммах Фурье и на распознаваемом объекте, на поверхности ПЗС-матрицы. При записи микроголограмм Фурье используется угловое мультиплексирование.

При рассмотрении распознавания внутренних структур в движущихся объектах, объект, записанный на голографический диск и совпадающий с эталоном, проходит через поле освещения, формируемое линзой L#7. В результате фиксируется периодическое изменение освещенностей на поверхности ПЗС-матрицы, при этом распределение освещенностей некоторое время будет оставаться однородным.

Очевидно, что в случае смещения волновых полей распознаваемого объекта и эталона на величину, кратную длине волны лазерного излучения, распределение световой энергии по поверхности ПЗС-матрицы будет максимально ярким, а кратное полутолщине — максимально тусклым. По этой причине, в отличие от стандартного голографического коррелятора [7, 8], принцип распознавания основан не на аналоговом вычислении корреляционной функции, а на проверке условия, что разность значений интенсивности лазерного излучения между различными пикселями ПЗС-матрицы и, соответственно, глубин потенциальных ям не превышает заданного уровня, определяемого выбранной схемой категоризации внутренних структур. Отметим, что степень огрубления категоризации обусловлена как необходимой степенью точности распознавания, так и объемом доступной памяти голографического диска. Степень огрубления категоризации ε , соответствующая задаче автоматического поиска включений в заданном объеме, может быть связана с количеством голограмм N , записанных на диске, следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{1}{N}. \quad (1)$$

В связи со слабой некогерентностью света, прошедшего через полупрозрачное тело, количество записанных голограмм не должно превышать значения, определяемого принципом разрешимости Рэля.

Так как величины накопленного заряда в каждом пикселе тем больше, чем глубже соответствующая потенциальная яма, то критерий распознавания может быть введен через параметр неоднородности распределения заряда по поверхности ПЗС-матрицы K_{ch} :

$$1 - K_{ch} < \varepsilon, \\ K_{ch} = \frac{\langle Q \rangle}{Q_{max}},$$

где $\langle Q \rangle$ — усредненное по всей площади поверхности ПЗС-матрицы значение величины заряда, индуцированного на ней внешним полем. Отметим, что в случае полного совпадения волновых фронтов объекта и эталона выполняется условие: $Q_{max} = Q_{min} = \langle Q \rangle$. Это соотношение остается неизменным в течение некоторого времени Δt и при распознавании структур в

движущихся объектах, поскольку в этом случае будет только периодически меняться освещенность, но не однородность освещения. Исходя из этого, можно предположить, что только одной голограммы, записанной в статике, достаточно для однозначной идентификации объекта. Например, если расстояние между распознаваемыми объектами L , скорость их поступательного движения v , и количество записанных на голографическом диске голограмм N , то это время можно оценить следующим образом

$$\Delta t = \frac{L}{vN}$$

Поскольку количество голограмм ограничено доступной памятью на диске, то количество всех возможных размещений эталонного образа включения, записанного на голографический диск, внутри допустимого объема ΔV накладывает следующее условие

на элементарный объем распознаваемого объекта, с которым производится сравнение:

$$\Delta V_0 = \frac{\Delta V}{N}$$

Объем, в котором допустимо варьирование расположением и формой включений, задается, исходя из условия нахождения включения в шаровом сегменте заданного объема:

$$\Delta V(r_0, \theta_0, \varphi_0) = \int_{\varphi_0}^{\varphi_0 + \Delta\varphi} \int_{\theta_0}^{\theta_0 + \Delta\theta} \int_{r_0}^{r_0 + \Delta r} r_a \sin(\theta_a) dr_a d\theta_a d\varphi_a$$

где r_a , θ_a и φ_a — радиус-вектор, азимутальный и полярный углы элемента объема в соответствующей области:

$$\begin{cases} r_0 < r_a < r_0 + \Delta r \\ \theta_0 < \theta_a < \theta_0 + \Delta\theta \\ \varphi_0 < \varphi_a < \varphi_0 + \Delta\varphi \end{cases}$$

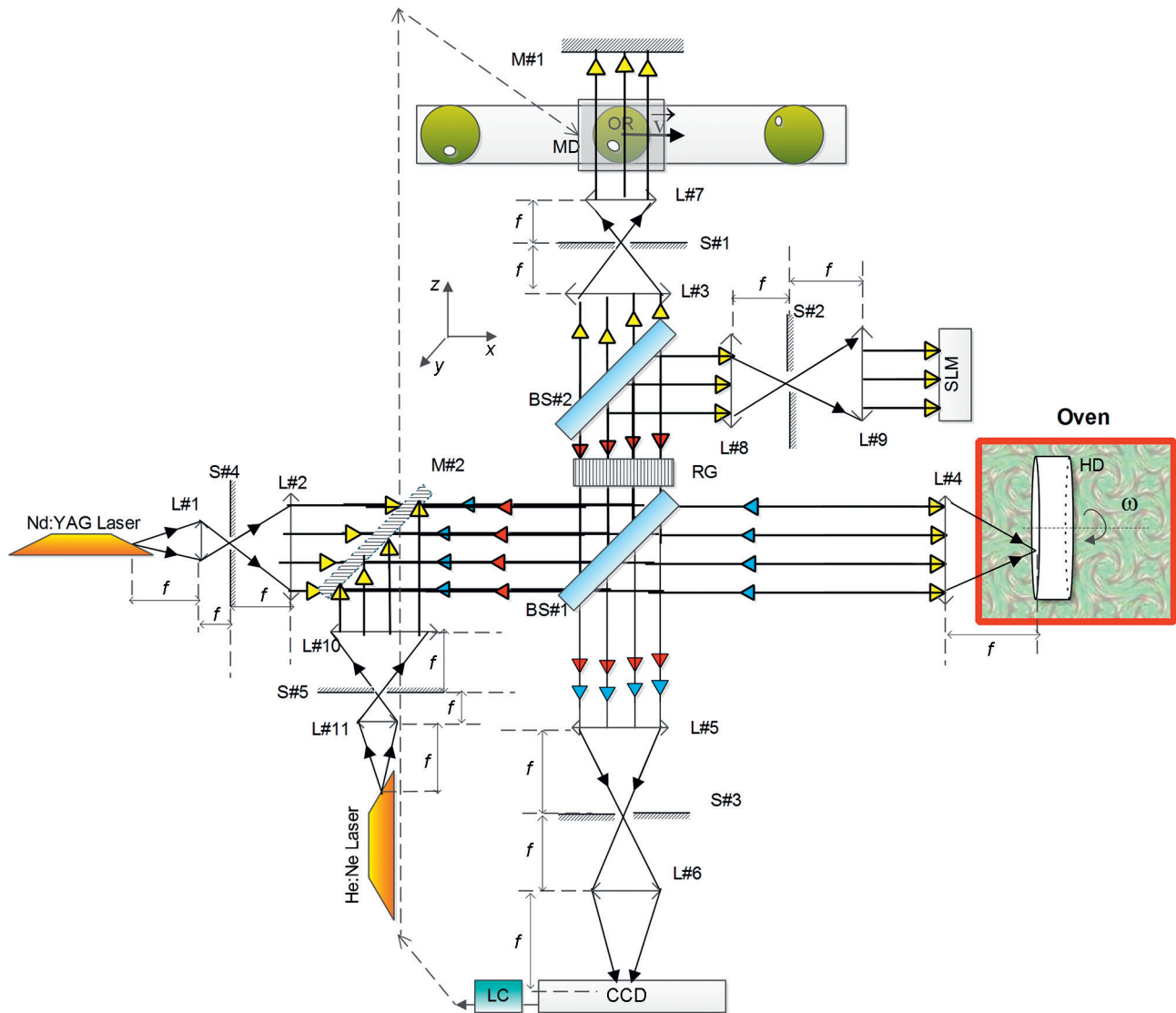


Рисунок. Принципиальная схема голографического томографа.

L#1–11 – собирающие линзы; S#1–5 – оптические затворы; M#1–2 – зеркала; BS#1–2 –разделители луча

Figure. The principle scheme of holographic correlator.

L#1–11 – focusing lenses, S#1–5 – beam shutters, M#1–2 – mirrors, BS#1–2 – beam splitters

Рассмотрим принцип работы предлагаемой установки (рисунок) для автоматического распознавания образов. На этапе приема и записи информации на голографический диск HD оптические затворы S#1, S#3 и S#5 закрыты, а затворы S#2 и S#4 открыты. Зеркало M#2 выдвинуто за пределы лазерного луча. Подавая напряжение на соответствующие пиксели пространственного модулятора света SLM, формируется сигнальная световая волна, соответствующая критерию отбора/распознавания. Интерференция данной сигнальной световой волны совместно с плоской световой волной от импульсного Nd:YAG лазерного источника формирует дифракционную решетку в объеме голографического диска. Фиксация дифракционной решетки, сформированной в объеме регистрирующей среды голографического диска, достигается его нагревом в печи Oven. Голографический диск представляет собой слой регистрирующей среды, нанесенную на отражающую поверхность. На следующем этапе оптические затворы S#2 и S#4 закрываются, а затворы S#1, S#3 и S#5 открываются. Зеркало M#2 вдвигается в пределы лазерного луча, как показано на рисунке. Таким образом, формируются два плеча интерферометра Майкельсона, где свет от He:Ne лазера непрерывного действия, отраженный от вращающегося голографического диска, служит в качестве опорного (референтного) луча. В сигнальном плече интерферометра Майкельсона за линзой L#7 формируется фронт плоской волны, падающий на движущийся полупрозрачный объект OR с различными непрозрачными включениями, форму и расположение которых требуется определить. Механический привод MD выполняет отбраковку объектов в соответствии с их автоматической идентификацией. Автоматическая идентификация осуществляется на основе логической схемы LC, обрабатывающей выходной сигнал от ПЗС-

матрицы (CCD), на основе условия (1). Логическая схема состоит из сумматора, делителя и компаратора уровней напряжений, а также пикового детектора.

В силу наличия спеклов при рассеянии когерентного излучения на полупрозрачном объекте для улучшения качества сравнения с волновым полем эталонного объекта, записанного на голографическом диске, волновой фронт от исследуемой структуры внутри данного объекта должен быть адаптивно промодулирован решеткой Ронки RG, [9]. Для большего увеличения отношения сигнал/шум использована собирающая линза L#6, и плоскость ПЗС-матрица расположена на расстоянии до ее фокальной плоскости. В данной схеме предполагается, что все линзы (двойко- или одновыпуклые) имеют одинаковое фокусное расстояние f . Для снижения влияния тепловых и вибрационных шумов в установке применена схема Паунда–Древера–Холла (Pound–Drever–Hall frequency stabilization technique).

Заключение

В работе представлена принципиальная схема автоматического распознавания внутренних структур в движущихся полупрозрачных объектах. Предложен критерий распознавания, основанный на муаровой голографической интерферометрии, который соответствует степени равномерности распределения световой энергии по засвеченной площади ПЗС-матрицы. Подбор наилучших вариантов для идентификации внутренних структур в движущихся объектах осуществляется путем перебора всех возможных вариантов при помощи вращения голографического диска, на котором записаны дифракционные решетки, соответствующие волновым фронтам эталонных объектов.

Литература

1. Ellebrecht D.B., Kuempers Ch., Horn M., Keck T., Kleemann M. Confocal laser microscopy as novel approach for real-time and in vivo tissue examination during minimal-invasive surgery in colon cancer // *Surgical Endoscopy*. 2019. V. 33. N 6. P. 1811–1817. <https://doi.org/10.1007/s00464-018-6457-9>
2. Hillman C.S., Lührs Ch., Bonin T., Koch P., Hüttmann G. Holography–holographic optical coherence tomography // *Optics Letters*. 2011. V. 36. N 13. P. 2390–2392. <https://doi.org/10.1364/OL.36.002390>
3. Ahmad A., Srivastava V., Dubey V., Mehta D.S. Ultra-short longitudinal spatial coherence length of laser light with the combined effect of spatial, angular, and temporal diversity // *Applied Optics Letters*. 2015. V. 106. N 9. P. 093701. <https://doi.org/10.1063/1.4913870>
4. Stetson K.A., Powel R.L. Hologram interferometry // *Journal of the Optical Society of America*. 1966. V. 56. N 9. P. 1161–1166. <https://doi.org/10.1364/JOSA.56.001161>
5. Brandt G.B. Hologram-moiré interferometry for transparent objects // *Applied Optics*. 1967. V. 6. N 9. P. 1535–1540. <https://doi.org/10.1364/AO.6.001535>
6. Ryf R., Montemezzani G., Günter P., Grabar A.A., Stoika I.M., Vysochanskii Yu.M. High-frame-rate joint Fourier-transform correlator based on Sn2P2S6 crystal // *Optics Letters*. 2001. V. 26. N 21. P. 1666–1668. <https://doi.org/10.1364/OL.26.001666>
7. Vander Lugt A. Signal detection by complex spatial filtering // *IEEE Transactions on Information Theory*. 1964. V. 10. N 2. P. 139–145. <https://doi.org/10.1109/TIT.1964.1053650>

References

1. Ellebrecht D.B., Kuempers Ch., Horn M., Keck T., Kleemann M. Confocal laser microscopy as novel approach for real-time and in vivo tissue examination during minimal-invasive surgery in colon cancer. *Surgical Endoscopy*, 2019, vol. 33, pp. 1811–1817. <https://doi.org/10.1007/s00464-018-6457-9>
2. Hillman C.S., Lührs Ch., Bonin T., Koch P., Hüttmann G. Holography–holographic optical coherence tomography. *Optics Letters*, 2011, vol. 36, no. 13, pp. 2390–2392. <https://doi.org/10.1364/OL.36.002390>
3. Ahmad A., Srivastava V., Dubey V., Mehta D.S. Ultra-short longitudinal spatial coherence length of laser light with the combined effect of spatial, angular, and temporal diversity. *Applied Optics Letters*, 2015, vol. 106, no. 9, pp. 093701. <https://doi.org/10.1063/1.4913870>
4. Stetson K.A., Powel R.L. Hologram Interferometry. *Journal of the Optical Society of America*, 1966, vol. 56, no. 9, pp. 1161–1166. <https://doi.org/10.1364/JOSA.56.001161>
5. Brandt G.B. Hologram-moiré interferometry for transparent objects. *Applied Optics*, 1967, vol. 6, no. 9, pp. 1535–1540. <https://doi.org/10.1364/AO.6.001535>
6. Ryf R., Montemezzani G., Günter P., Grabar A.A., Stoika I.M., Vysochanskii Yu.M. High-frame-rate joint Fourier-transform correlator based on Sn2P2S6 crystal. *Optics Letters*, 2001, vol. 26, no. 21, pp. 1666–1668. <https://doi.org/10.1364/OL.26.001666>
7. Vander Lugt A. Signal detection by complex spatial filtering. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1964, vol. 10, no. 2, pp. 139–145. <https://doi.org/10.1109/TIT.1964.1053650>

8. Weaver C.S., Goodman J.W. A technique for optically convolving two functions // *Applied Optics*. 1966. V. 5. N 7. P. 1248–1249. <https://doi.org/10.1364/AO.5.001248>
9. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Камшилин А.А., Ромашко Р.В. Адаптивные методы обработки спекл-модулированных оптических полей. М.: Физматлит, 2009. 223 с.
8. Weaver C.S., Goodman J.W. A technique for optically convolving two functions. *Applied Optics*, 1966, vol. 5, no. 7, pp. 1248–1249. <https://doi.org/10.1364/AO.5.001248>
9. Kulchin Y.N., Vitrik O.B., Kamshilin A.A., Romashko R.V. *Adaptive Methods for Processing of Speckle-Modulated Optical Fields*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 223 p. (in Russia)

Авторы

Ляхов Константин Андреевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Математический институт имени В.А. Стеклова РАН, Москва, 119991, Российская Федерация, [sc](https://orcid.org/0000-0003-2023-5811) 18042561700, <https://orcid.org/0000-0003-2023-5811>, Lyakhov2000@yahoo.com

Григорьев Василий Аркадьевич — генеральный директор, Общество с ограниченной ответственностью «Митлаз-Р», Московская обл., г.о. Солнечногорск, 147552, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-7662-5769>, vagrigroriev@mail.ru

Циплакова Елизавета Георгиевна — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc](https://orcid.org/0000-0002-1229-4793) 57348346400, <https://orcid.org/0000-0002-1229-4793>, e.tsiplakova@itmo.ru

Authors

Konstantin A. Lyakhov — PhD, Senior Researcher, Steklov Mathematical Institute, Moscow, 119991, Russian Federation, [sc](https://orcid.org/0000-0003-2023-5811) 18042561700, <https://orcid.org/0000-0003-2023-5811>, Lyakhov2000@yahoo.com

Vasilii A. Grigoriev — General Director, Mitlas-R Ltd, Moscow Region, Solnechnogorsk, 147552, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7662-5769>, vagrigroriev@mail.ru

Elizaveta G. Tsiplakova — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc](https://orcid.org/0000-0002-1229-4793) 57348346400, <https://orcid.org/0000-0002-1229-4793>, e.tsiplakova@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 01.07.2022
Одобрена после рецензирования 22.08.2022
Принята к печати 26.09.2022

Received 01.07.2022
Approved after reviewing 22.08.2022
Accepted 26.09.2022



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»