



ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИЙ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ МИКРОСКОП ДЛЯ ПРОЗРАЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

HIGH-RESOLUTION DIGITAL HOLOGRAPHIC MICROSCOPE FOR TRANSPARENT OBJECTS

Б.Г.Турухано¹, заведующий ЛГИИС, Заслуженный изобретатель РФ, Н.Турухано¹, вед. науч. сотр., Заслуженный изобретатель РФ, И.А.Турухано², кинооператор / luc933@mail.ru

B.G.Turukhano¹, Head of LGIIS, Honored Inventor of RF, N.Turukhano¹, Leading Researcher, Honored Inventor of RF, I.A.Turukhano², Cameraman

DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.3-4.232.238

Получено: 26.05.2021 г.

В данной работе предлагается использование сферической цифровой матрицы для записи голограммы в цифровом голографическом микроскопе для регистрации высокочастотной составляющей фазового объекта с целью увеличения разрешения его восстановленного изображения и тем самым его качества. При этом габариты цифрового голографического микроскопа сохраняются.

In this paper, it is proposed the use of a spherical digital matrix for recording a hologram in a digital holographic microscope to obtain the high-frequency component of a phase object with the aim of increasing the resolution of its reconstructed image and thereby its quality. At the same time, the dimensions of the digital holographic microscope are preserved.

ВВЕДЕНИЕ

На смену оптическому микроскопу пришел цифровой голографический микроскоп (ЦГМ), который пока не лучше первого, но с гораздо более широкими возможностями в нашем современном цифровом мире, но не достигший пока пика своего совершенства. Однако он имеет большие перспективы вписаться в цифровые автоматизированные системы, начинающие заменять человека в новом информационном пространстве. Кроме этого, несмотря на успехи в создании различных оптических элементов, тем не менее, полностью исключить их недостатки (абберации линз, объективов и т.д.) практически невозможно, хотя, используя сложный математический аппарат, их можно существенно уменьшить. Для усовершенствования ЦГМ (DHM – Digital In-Line Holographic Microscope) необходимо сделать многое, тем не менее, его перспективы представляются более

реальными. В ЦГМ запись осуществляется не в светочувствительном фотоматериале, как в классической голографии, а с помощью электронного устройства. Лазерный пучок света разделяется на два и в том месте, где предметный и опорный пучки пересекаются, интерферируя друг с другом, устанавливается ПЗС-матрица, записывающая голограмму. Полученная ею информация воспринимается в цифровой форме и передается на компьютер в виде массива чисел. В цифровой голографии используется хорошо известная теория дифракции для численного реконструирования изображения в виде массива комплексных чисел, представляющих собой амплитуду и фазу оптического поля [1].

Цифровая голография как основа ЦГМ представляет собой анализ, синтез и моделирование волновых полей с привлечением современных средств и методов обработки сигналов, из которых

¹ ЛГИИС – Лаборатория голографических информационных и измерительных систем, НИЦ “Курчатовский Институт” – ПИЯФ, г. Гатчина / LHIMS, Laboratory of Holographic Information and Measurement Systems, NRC “Kurchatov Institute” – PYAF, Gatchina.

² Санкт-Петербургский университет кино и телевидения “КИТ” / St. Petersburg State University of Film and Television.

важнейшими в настоящее время являются средства цифровой вычислительной техники.

ИЗМЕРЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Использование сферической матрицы [2] в цифровом голографическом микроскопе (в дальнейшем ЦГМС) позволит существенно увеличить количество информации о регистрируемом предмете, так как этой матрицей улавливается более широкая полоса частот за счет регистрации интерференции, с участием объектной (предметной) волны, содержащей его высокие гармоники. Чем больше регистрируется высоких частот, тем лучшего качества и разрешения получается восстановленное изображение.

ЦГМС может использоваться в качестве измерительной системы для исследования следов ядерных заряженных частиц в облученной на ускорителях пузырьковой камере [3, 4], неинвазивной экспресс-диагностики многокомпонентных биологических сред для определения вирусов, бактерий и других микроорганизмов в водоемах, на Земле и на других космических телах путем цифровой записи голограммы среды (в том числе жидкой) и цифрового восстановления ее изображения с сохранением амплитуды и фазы волны.

Цифровая голография существенно улучшает классическую голографию, в том числе, увеличивает скорость обработки информации и чувствительность системы.

Со временем, с большой вероятностью, будет происходить существенное увеличение разрешения матриц не меньше чем у светочувствительных фотоматериалов, позволяющих записать высокочастотную часть спектра голографируемого предмета, что важно особенно для микро- или отдаленных объектов. Впервые Клод Шеннон* предложил в 1948 году формулу для вычисления количества информации, необходимой для большей определенности событий, в нашем случае идентифицированного и анализируемого с помощью микроскопа объекта, что осуществляется посредством увеличения разрешения системы ЦГМС:

$$C = F \cdot \log(1 + P_s/P_n) = F \cdot \log(1 + P_s/N_0 F), \quad (1)$$

где F – полоса частот канала (Гц), P_s – мощность сигнала, P_n – мощность шума, N_0 – спектральная плотность мощности шума (Гц). Из формулы (1) видно, что определяющим фактором при получении информации об исследуемом объекте является величина частотной полосы – F , которая в случае ЦГМС увеличивается благодаря тому, что

сферическая матрица захватывает практически весь спектр высоких частот объекта. В рассматриваемом цифровом голографическом микроскопе со сферической матрицей ЦГМС регистрируется безлинзовая голограмма Френеля. Распределение интенсивности $I(x,y)$ в зарегистрированной на матрице приемного устройства в плоскости записи голограммы (x,y) определяется квадратом модуля суммы комплексных амплитуд объектной $O(x,y)$ и опорной (референтной) $F(x,y)$ волн:

$$I(x,y) = |O(x,y)|^2 + |F(x,y)|^2 + O(x,y)F^*(x,y) + O^*(x,y)F(x,y), \quad (2)$$

где знак $*$ обозначает комплексно-сопряженную величину $O(x,y)^*$, а $|O(x,y)|\exp(i\phi_o(x,y))$ – комплексную амплитуду объектной волны с вещественной амплитудой $|O(x,y)|$ и фазой $\phi_o(x,y)$, $F^*(x,y) = |F(x,y)|\exp(i\phi_R(x,y))$ – комплексная амплитуда опорной волны. Интенсивность (2) представлена в виде массива пикселей ($M \times N$). Последние два члена уравнения (2) содержат информацию об амплитуде и фазе объектной волны. Эта информация может быть выделена с помощью пространственной фильтрации с использованием метода преобразования Фурье. При реконструкции изображения умножим интенсивность интерференционной картины записанной голограммы, то есть $I(x,y)$ на значения поля опорной волны, $F(x,y)$ с помощью которой мы восстанавливаем голограмму:

$$I(x,y)F(x,y) = |F(x,y)|^2 F(x,y) + |O(x,y)|^2 F(x,y) + O(x,y)F^2(x,y) + O^*(x,y)F^2(x,y). \quad (3)$$

После фильтрации и обратного преобразования Фурье мы получаем комплексную амплитуду объектного волнового фронта (3). Из полученной в цифровом виде комплексной амплитуды объектной волны O^* может быть рассчитана и ее фаза ϕ . Устройство способно сохранить все данные в своей базе и осуществить их анализ в реальном времени или постфактум. Причем эти процессы и обработку данных можно осуществить в автоматическом режиме [5].

Для решения более широкого и полного круга задач и определения координат точечных объектов была выполнена и стала доступна и другая программа [6]. Эти программы позволяют осуществить полный заверченный круг регистрации голограммы с помощью матрицы фотоприемников и вести обработку ее восстановленного изображения.

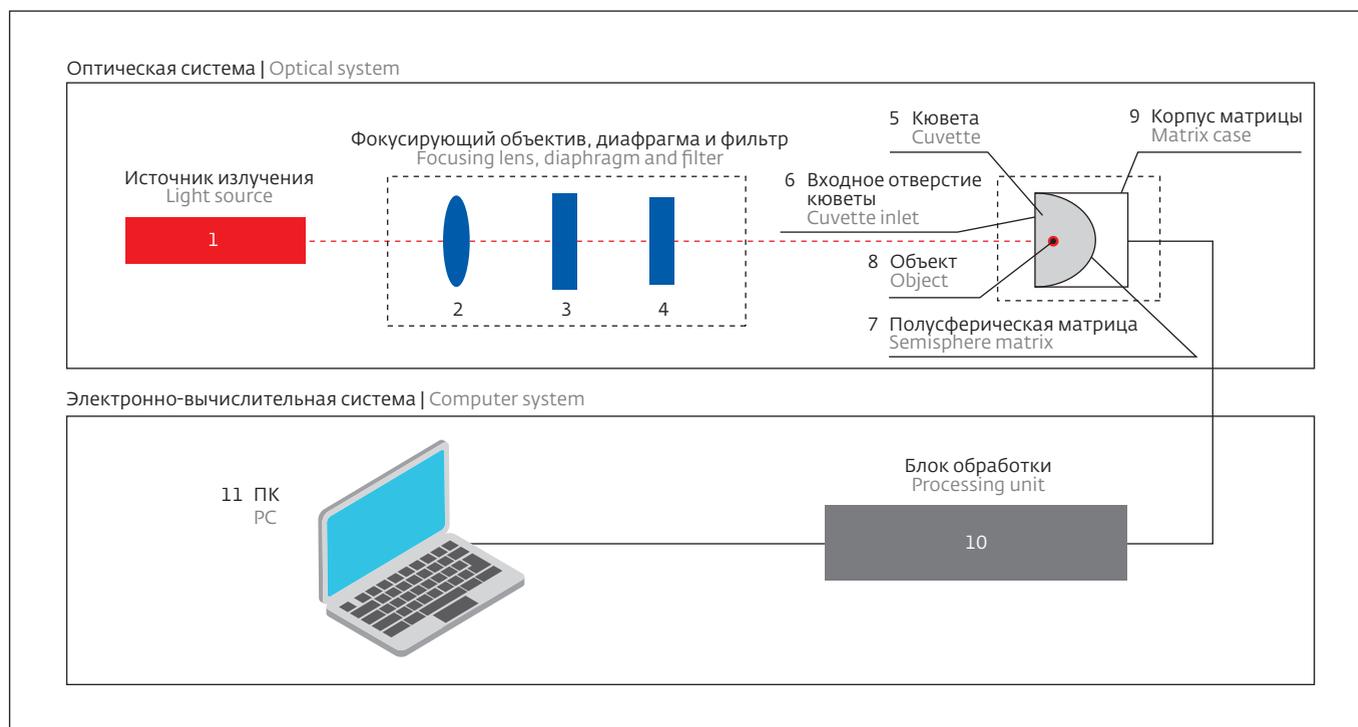


Рис.1. Блок-схема ЦГМС. Источник излучения – лазер
 Fig.1. Diagram of the DHMS. Radiation source – laser

Однако в настоящее время реализованы только методы скоростной регистрации цифровых голограмм, но и не их скоростная обработка. Это делает актуальной разработку и исследование новых принципов анализа цифровых голограмм, в том числе, в данном случае и при использовании сферической матрицы, регистрирующей голограмму.

Наилучшее разрешение исследуемых объектов достигнуто в настоящее время с помощью ЦГМ с плоской матрицей на уровне 225 нм [7] с использованием ультрафиолетового излучения ($\lambda = 372$ нм) и CMOS-матрицы с пикселем в 1,12 мкм. В работе [8] описывается ЦГМ, содержащий также плоскую матрицу CCD-камеры. В этом ЦГМ на голограмме записывается, в основном, низкочастотный спектр интерференционной картины, в результате чего система позволяет восстанавливать объекты с ограниченным разрешением. Это связано с тем, что апертура записывающей плоской матрицы CCD-камеры небольшая, и высокочастотная часть спектра интерференционной картины, расположенной на периферии голограммы, выпадает из общего контекста. Кроме этого, в силу Гауссова распределения лазерного пучка интерферограмма, записанная в плоскости матрицы CCD-камеры, не одинакова по яркости и контрастности.

Однако существующие в настоящее время системы и программы для ЦГМ не решают вопрос, связанный с повышением разрешающей способности системы на стадии записи голограммы. Описываемый авторами данный ЦГМС позволяет: 1 – осуществить равномерное освещение по сечению пучка путем сглаживания распределения Гаусса источника излучения; 2 – повысить разрешение ЦГМС за счет увеличения апертуры матрицы фотоприемников благодаря ее форме в виде полусферы, позволяющей зарегистрировать высокочастотные интерференционные полосы голограммы; 3 – увеличить объем с исследуемым объектом при сохранении его разрешения.

На рис.1 дана блок-схема ЦГМС. Дополнительно до кюветы 5 введен фильтр 4 для сглаживания гауссового распределения пучка излучения и получения равномерного освещения по сечению пучка. Это позволяет сохранить одинаковую светосилу по сечению пучка от источника излучения (лазера) 1. Далее установлены фокусирующий микрообъектив 2, диафрагма 3, фильтр 4, кювета 5, плоское входное окно кюветы 6, полусферическое, выходное окно кюветы 7, исследуемый объект 8, блок со сферической цифровой матрицей 9, блок обработки 10 и ПК 11.

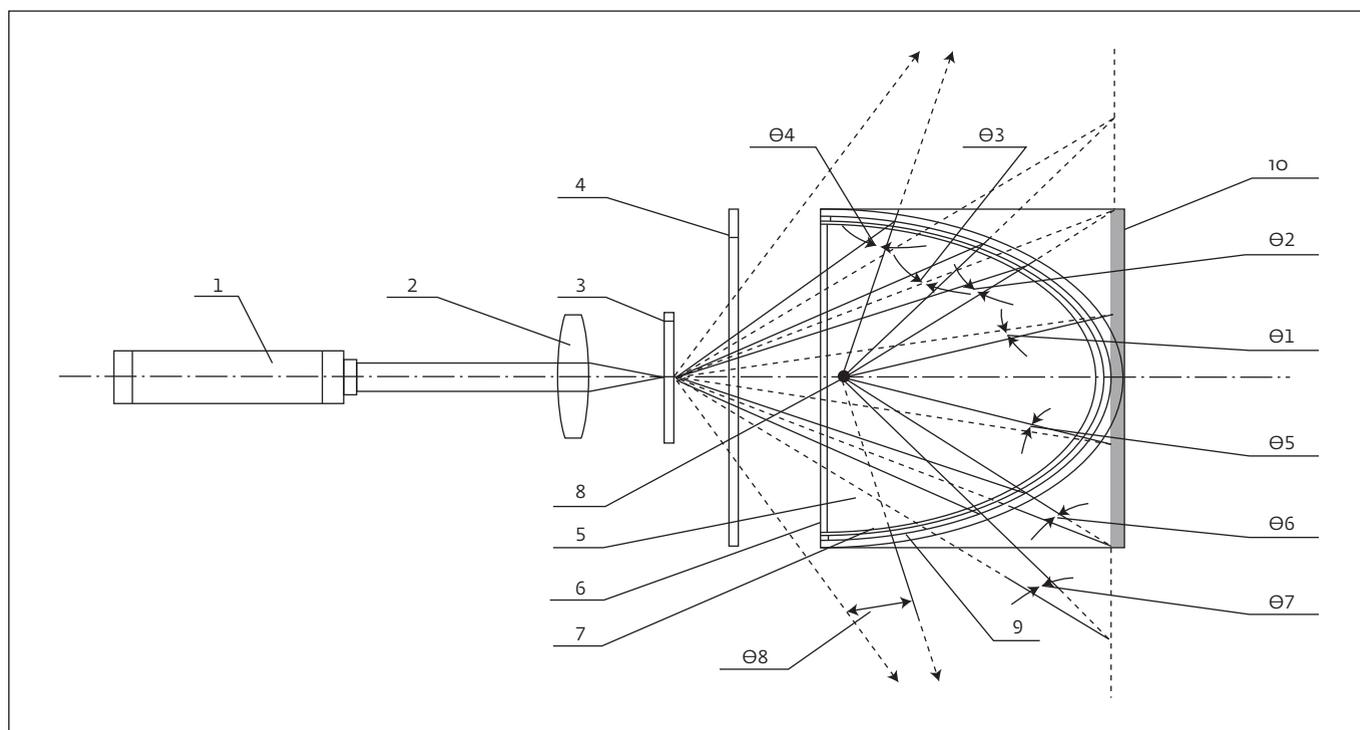


Рис.2. Устройство ЦГМС для записи безлинзовой Фурье (Френелевской) голограммы прозрачных объектов
 Fig.2. DHMS device for recording lensless Fourier (Fresnel) hologram of transparent objects

ЦГМС содержит электронно-вычислительную систему, включающую блок обработки данных с программным обеспечением 10 и ПК II. Выходное окно кюветы имеет форму полусферы с радиусом, равным расстоянию от входного до выходного окна кюветы. Матрица фотоприемников имеет форму полусферы и расположена параллельно выходному окну кюветы, повторяя его форму, и жестко с ним связана. На рис.2 изображен конкретный пример конструктивного решения предлагаемого устройства ЦГМС для записи безлинзовой голограммы Френеля с точечным источником излучения. Устройство ЦГМС используется для записи безлинзовой Фурье-голограммы прозрачного объекта. Полусферическая матрица 9 состоит из матрицы фотоприемников. На рис.2 конкретно показано несколько углов между объектными и вспомогательными лучами $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$, участвующими в создании голограммы на внутренней поверхности полусферической матрицы. На рис.2 дано сравнение одновременно картин интерференции пучков в случае использования устройства ЦГМС с полусферической матрицей 7 (сплошные линии) и ЦГМ с плоской матрицей 10 (линии пунктиром), где $\theta_5, \theta_6, \theta_7, \theta_8$, – углы между объектными и вспомогательными лучами, участвующими в создании голограммы на внутренней поверхности плоской матрицы.

Устройство работает следующим образом: пучок от источника излучения 1 попадает на микрообъектив 2, который фокусирует его. В фокусе микрообъектива установлена диафрагма 3, размером до нескольких единиц микрона. После этого пучок проходит через фильтр 4, сглаживающий Гауссово распределение источника излучения и превращающий его в равномерное по всему поперечному сечению. Далее пучок через плоское входное окно 6 поступает в кювету 5 с исследуемым объектом 8, дифрагируя на нем, и направляется сквозь прозрачное выходное окно в виде полусферы 7 в сторону полусферической матрицы 9. Кювета у своего основания (входного окна 6) позволяет пропускать через него поток излучения от источника и имеет выходное окно для его вывода и вывода потока излучения, отраженного от объекта. Как видно на рис.2, все рассеянные объектом лучи в пределах полусферы интерферируют с соответствующими вспомогательными (неискаженными) лучами под углами $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ и попадают на полусферическую матрицу, создавая картину в виде интерференционных полос. На рис.2 пунктиром показаны объектные лучи, интерферирующие с референтными лучами под углами θ_5, θ_6 , попадающими на плоскую матрицу, используемую в качестве



регистрирующей голограммы, и в этом же случае, θ_7 , θ_8 , которые не могут попасть на плоскую матрицу в силу ее ограниченного размера, и не будут давать интерференцию на плоской матрице. При существенном увеличении размеров плоского экрана, светосила периферийных лучей, попадающих на матрицу, особенно под углами θ_7 , θ_8 , в силу их большой расходимости, наклона падения и отдаленности от оси системы намного меньше по сравнению со светосилой лучей, которые регистрируются ближе к оптической оси. Даже в этом случае сложно будет записать на матрице голограмму, с которой можно получить изображение объекта с улучшенной регистрацией голограммы устройствами ЦГМС. Для этого необходимо иметь очень большой динамический диапазон fotocувствительности фотоприемников, в то время как при записи на полусферической матрице сохраняется светосила лучей практически на всей поверхности матрицы из-за малого удаления от источника сферических волн - диафрагмы. Из рис.2 видно также, что углы $\theta_i(j)$, где $i=1, 2, 3, 4$ для полусферической матрицы и $j=5, 6, 7, 8$ для плоской матрицы между диафрагирующими лучами на объекте и лучами референтной волны $R(x,y)$ растут по мере удаления от оси системы и приближения к входному окну кюветы b , то есть

$$\theta_1(5) < \theta_2(6) < \theta_3(7) < \theta_4(8) \quad (4)$$

и их синусы $\sin \theta_i(j)$ также растут, $\sin \theta_1(5) < \sin \theta_2(6) < \sin \theta_3(7) < \sin \theta_4(8)$, а согласно формуле (4) $\nu = 2(\sin \theta_i(j)/2)/\lambda$ частота ν интерференционных полос, образованных в результате их интерференции, также растет. Максимальный угол, образованный референтным и объектным дифрагированными лучами, близкими к входному окну кюветы, дает пересечение у плоской матрицы размером, близким к бесконечности, что требует существенного увеличения ее размера, что практически нереализуемо. С другой стороны, регистрация интерференции этих периферийных лучей необходима для повышения разрешения системы. Такие большие размеры плоской матрицы, следовательно и системы в целом, неудобны не только для портативной, но даже для стационарной системы, так как в этом случае необходимо увеличить вибростойкость и термостабильность системы, которые влияют на качество (разрешение) голограммы. Чем меньше период полос, регистрируемых голограммой, тем выше должно быть ее разрешение. Разрешение

голограммы H согласно критерию Аббе - Rayleigh дается выражением:

$$H = k \lambda f / D, \quad (5)$$

где k - постоянный коэффициент и зависит от формы матрицы, λ - длина волны источника излучения, f - расстояние от объекта до регистрирующего экрана, D - апертура матрицы. Разрешение ЦГМ зависит от следующих факторов:

- а. λ - длина волны источника излучения. ЦГМ, использующий более короткую длину волны λ , обладает большим разрешением, так как на голограмме записывается голограмма с большей пространственной частотой интерференционных полос, а впоследствии, при восстановлении голограммы, это приводит к более высокому разрешению восстановленного изображения объекта/ов и расширению его частотного диапазона. Однако работать в УФ-области и с $\lambda < 0,3$ мкм сложно, а воздействие УФ-излучения на исследуемые биологические объекты изучено недостаточно. Поэтому для существующих ЦГМ при исследованиях биологических объектов выбирают источники с малой λ в видимой области спектра с учетом их неразрушающего воздействия на исследуемый объект;
- б. Апертура D матрицы ЦГМ линейно связана с разрешением ЦГМ и в существующих системах ЦГМ, зависит от ряда факторов: ограничения геометрических размеров и допустимого веса, определяемого конкретными задачами в каждом отдельном случае. Небольшие габариты ЦГМ связаны с определенными ограничениями при его использовании на земле, в космосе и под землей, с его погружением на большие глубины, где диаметр скважин и, соответственно, погружающихся исследовательских устройств ограничен техническими и технологическими условиями, или при их поднятии в космос, где также имеет место сильное ограничение габаритов и веса летательных аппаратов. ЦГМ, использующие схему Габоровской соосной (онлайн) голографии [9], где, благодаря малой апертуре записывающих матриц, осуществляют регистрацию низких пространственных частот интерферирующих пучков, появляющихся в результате интерференции при малых углах между объектным и референтным пучками. В случае применения схемы офлайн-записи голограммы с применением референтного несоосного пучка в плоскости регистрации голограммы имеет место интерференция двух

пучков с нарастающей пространственной частотой к периферии. Согласно определению передаточной функции, в оптической части ЦГМ передаточная функция $A(v_x, v_y)$ представляет собой отношение выходного сигнала к входному в частотном представлении: $A(v_x, v_y) = E(v_x', v_y') / I(v_x, v_y)$, где $E(v_x', v_y')$ и $I(v_x, v_y)$ – соответственно, распределение освещенности изображения (выходного сигнала) и яркости объекта (входного сигнала), v_x', v_y' – пространственные частоты изображения, v_x, v_y – пространственные частоты объекта. При этом пространственная частота изображения v' и объекта v линейно связаны между собой $v = \beta v'$ при увеличении системы. Поэтому потеря высоких частот (на входе) при регистрации интерференционной картины на матрице ЦГМ, отвечающей за тонкую структуру объекта, напрямую и линейно будет связана с потерей этих же частот в пространстве восстановленного изображения (на выходе), что приводит к уменьшению передаточной функции $A(v_x, v_y)$ и разрешения системы в целом. Таким образом, увеличение разрешения ЦГМ можно достигнуть путем линейного сохранения баланса всех частот объекта и его восстановленного изображения благодаря регистрации высоких частот интерференционных полос, зарегистрированных на матрице при данной длине волны λ . Известно, что пространственная частота полос v , в свою очередь, зависит от угла θ между интерферирующими лучами и от длины волны λ источника излучения, согласно выражению:

$$v = 2(\sin\theta/2)/\lambda. \quad (6)$$

Как видно из выражения (6), чем больше угол θ , тем больше частота интерференционных полос, регистрируемых на голограмме, и, соответственно, тем меньше расстояние между ними, а, следовательно, тем выше должно быть разрешение для их пространственного разделения. Согласно критерию Рэлея, зарегистрированные на голограмме две интерференционные полосы равной интенсивности становятся разрешимы, когда главный максимум интенсивности одной полосы совпадает с первым минимумом другой полосы. При этом отношение интенсивностей в средней точке к интенсивности в максимуме равно 0,811.

в. Вблизи оптической оси голограммы – углы небольшие (рис.2), а их увеличение происходит по мере отдаления объектной волны от оптической оси, то есть к периферии голограммы. Необходимо отметить, что можно осуществить

обработку данных с голограммы для достижения высокого разрешения изображения, но только в рамках тех частот, которые зарегистрировала плоская матрица. С целью регистрации матрицей высоких частот проводились работы по приближению объекта к матрице [10] и с последующей цифровой обработкой данных.

Начиная с определенного угла объектных лучей, происходит их полное отражение, что приведет к тому, что соответствующие интерференционные полосы вообще не будут регистрироваться матрицей, тем самым исключая крайнюю часть матрицы из общего процесса регистрации, и, соответственно, более высокие периферийные (крайние) частоты, которые должны были бы на ней регистрироваться.

В случае, когда расстояния от исследуемого объекта до плоской матрицы малы, френелевское приближение уже недействительно и с целью получения высокого разрешения необходимо вести цифровую обработку с учетом характеристик пикселя (тип, плотность и площадь). Такая обработка нужна для повышения разрешения системы и увеличения отношения сигнал/шум для уменьшения вероятности появления ложных сигналов при восстановлении объекта и его характеристик. Кроме этого, при попытках приближения исследуемых объектов к матрице уменьшается рабочий объем кюветы, а время набора статистических данных увеличивается. Разрешение системы растет с уменьшением величины $f_{сфм}$, где f – расстояние от объекта до регистрирующего экрана. Из рис.2 видно, что ход лучей, распространяющихся от исследуемого объекта до полусферической матрицы – сплошные линии, которые всегда меньше длины хода лучей от исследуемого объекта до плоской матрицы (их продолжение указано пунктиром), то есть $f_{сфм_{A_i}} < f_{плм_{(A_i+B_i)}}$, где A_i – отрезок луча до полусферической матрицы, B_i – отрезок луча до плоской матрицы, i – условное порядковое число луча, возрастающее по мере удаления от оптической оси. Исключение составляют только лучи, совпадающие с оптической осью ($i=0$): $f_{сфм_{A_0}} < f_{плм_{B_0}}$, так как $A_0 = B_0$.

Так как для объекта 8, изображенного на рис.2, то

$$f_{сфм_{A_4}} \approx f_{сфм_{A_3}} \approx f_{сфм_{A_2}} \approx f_{сфм_{A_0}}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} f_{плм_{(A_1+B_1)}} &< f_{плм_{(A_2+B_2)}}, \\ f_{плм_{(A_3+B_3)}} &< f_{плм_{(A_4+B_4)}} \end{aligned} \quad (8)$$

очевидно, что разрешение у ЦГМС будет выше в сравнении ЦГМ с плоским экраном, причем, как видно из выражений (5) и (6), в этом случае разрешение



плоского экрана не только меньше, чем у полусферического экрана, но оно еще уменьшается с удалением от оси, так как к периферии фплм существенно растет.

Необходимо также сохранение одинаковой интенсивности по всему сечению пучка источника излучения, перпендикулярному оптической оси, с целью получения одинаковой интенсивности интерференционных полос на поверхности матрицы, которая регистрирует голограмму. Запись голограммы с разной интенсивностью интерференционных приведет к дополнительным проблемам при обработке восстановленной с матрицы информации. Преобразование распределения Гаусса, колоколообразного по сечению, можно осуществить с помощью фильтра Гаусса, относящегося к числу сглаживающих фильтров. Известны также фильтры типа "π-Shaper 12_12", конвертирующие Гауссово распределение лазерного пучка в его прямоугольное распределение, и они также усредняют интенсивность излучения по всему объему. В ЦГМС имеет место увеличение апертуры D матрицы, изготовленной в виде полусферы, благодаря которой осуществляется регистрация высокочастотной части голограммы.

Цель увеличения разрешения – разрешение наиболее близких интерференционных линий, образующихся в плоскости матрицы при регистрации голограммы, а также увеличение разрешения по всему исследуемому объему благодаря созданию матрицы и кюветы полусферической формы для сохранения компактности ЦГМС. Известно, что разрешающая способность голограммы пропорциональна ее размеру. Полусферическая матрица (рис.2) обладает большим размером (площадь/периметр) $(2\pi R^2/\pi R)$, чем плоская квадратная матрица (площадь/ширина) $(4R^2/2R)$ в $\pi/2=1,57$ раз, а это, в свою очередь, позволяет увеличить кювету с исследуемым объемом, при сохранении габаритов системы, делая ЦГМС более эффективным и удобным (особенно портативный вариант).

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ РАЗРЕШЕНИЯ ЦГМС

В связи с тем, что критерий Рэлея для оптических устройств определен эмпирическим путем, с целью снятия зависимости от субъективности восприятия (две соседние точки можно разрешить, если минимум интенсивности между ними достаточно мал, чтобы его разглядеть), то выражение разрешения согласно этому критерию имеет различный вид. К примеру: коэффициент k может иметь разное значение в зависимости от размера и формы матрицы оптической системы, а именно, если форма круглая, то он равен 1,22, если квадратная – 1, если полусфера – 0,63, так как чем больше

размер матрицы, тем выше разрешение при всех других равных условиях. Поэтому для ЦГМС $H = k\lambda f/D$ с учетом (рис.2), что $k=0,63$; $\lambda = 0,488$ мкм (Ar-лазер), а $f/D=0,312$, получаем следующее разрешение $H=0,63 \times 0,488 \times 0,312=0,095$ мкм.

Таким образом, разрешение ЦГМС с полусферической матрицей равно 95 нм без использования специальной математической обработки.

ВЫВОДЫ

В данной работе предложены конструктивные решения с использованием:

- фильтра для сглаживания Гауссового распределения пучка источника излучения с целью увеличения светосилы периферийной картины интерференционных полос, регистрируемых на матрице;
- полусферической матрицы, позволяющей зарегистрировать высокочастотные интерференционные полосы голограммы, определяющие высокое разрешение восстановленного изображения;
- для увеличения разрешения ЦГМС с исследуемым объектом стало возможным создание компактной измерительной системы.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Демин В.В., Каменев Д.В. Известия вузов. Радиофизика. Томский госуниверситет. Т. LVII. 2014. № 8. С. 59.
2. Ежов В.Ф., Сильнов С.В., Турухано Б.Г., Турухано Н., Соловей В.А. Патент РФ, № 2545494. 2015. Пр. 22.10.2013 г.
3. Турухано Б.Г. ЖТФ. 1970. № 1. С. 181.
4. Монтане Л., Ройкрофт С. УФН. 1984. Т. 142. Вып. 4. С. 636.
5. Электронный ресурс: Консультативный центр МАТЛАБ компания Soft Line http://www.nose.ru/matlab/Mata_RU/default.asp.hum.
6. "Digital Holography". Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2009614972 от 11.09.2009.
7. Greenbaum A., Aydogan O. Scientific Reports. 2013. P. 15.
8. Jericho S.K., Klages P., Nadeau J., Dumas E.M., Jericho M.H., Kreuzer H.J. Planetary and Space Science. 2009. Т. 58. P. 701.
9. Gabore D. Nature. 1948. № 161. P. 777.
10. Schnars U. WPO. Meas. Sci. Technol. 2002. № 13. P. 85.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

26–29.10.2021

www.chemistry-expo.ru



24-я международная
выставка химической
промышленности
и науки

ХИМИЯ

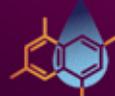
КНИМИА

Генеральный
информационный
партнер:

ЦЕНОВОЕ АГЕНТСТВО
ЖИМ
КУРЬЕР
www.chem-courier.com
КОНФЕРЕНЦИИ



Инновации
и современные
материалы



Нефтегазохимия



Startup ChemZone



Автоматизация
и цифровизация
производства



Химмаш. Насосы



Хим-Лаб-Аналит



Зеленая химия



Индустрия пластмасс



Защита от коррозии
«КОРРУС»

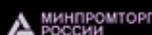
При поддержке:

- Министерства промышленности и торговли РФ
- ФГУП «НТЦ «Химвест»
- Российского Союза химиков
- ОАО «НИИТЭХИМ»
- Российского химического общества им. Д.И. Менделеева
- Химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
- РХТУ им. Д.И. Менделеева

Под патронатом ТПП РФ

12+

Реклама



Организатор:

ЭКСПОЦЕНТР

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»



ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

100% ГАРАНТИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ



Стоимость 2200 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru



Стоимость 1430 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.ru



Стоимость 1430 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

www.technosphere.ru



Стоимость 1056 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.ru



Стоимость 1287 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.ru



Стоимость 1716 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.ru