

УДК 538.958

<https://doi.org/10.25587/2222-5404-2025-22-3-55-69>

Оригинальная научная статья

Методы оценки и анализа разрешающей способности цифровых голографических микроскопов

А. Г. Федоров ✉, **Л. Л. Жондорова**, **Л. К. Федорова**

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,

г. Якутск, Российская Федерация

✉ ag.fedorov@s-vfu.ru

Аннотация

В настоящей работе рассматривается комплексный численный подход к оценке и анализу разрешающей способности цифровых голографических микроскопов. Рассмотрены пять ключевых факторов, оказывающих наибольшее влияние на качество восстановления изображения: расстояние от объекта до сенсора, временная и пространственная когерентность источника, физический размер пикселя детектора, а также оптическое поле зрения (Field of View, FOV). Для каждого из указанных факторов разработаны алгоритмы численного моделирования, объединенные в единую программную платформу, позволяющую проводить систематический анализ без необходимости проведения физических экспериментов. Это особенно актуально при разработке компактных и недорогих цифровых голографических микроскопов. Реализована численная модель распространения волны методом углового спектра, проведено моделирование типовой схемы голографического микроскопа. Валидация результатов и оценка разрешающей способности основаны на мишени USAF-1951. Установлено, что наиболее значимые ограничения связаны с размером пикселя, расстоянием между объектом и экраном и размерами области восстановления. Когерентные характеристики источника также оказывают влияние, однако в ряде практических случаев могут быть компенсированы на этапе проектирования. Показано, что разработанный алгоритм позволяет производить предварительную оценку теоретического предела разрешения для заданной конфигурации системы и выявлять доминирующие ограничения. Научная новизна работы заключается в объединении всех основных факторов в единой программной среде, что позволяет проводить численную оптимизацию параметров цифровых голографических микроскопов на этапе его проектирования. Предложенный подход может быть использован при создании портативных голографических микроскопов для задач биомедицины, мониторинга микропластика и других прикладных областей.

Ключевые слова: осевая голография, цифровая голографическая микроскопия, разрешающая способность, когерентность, численное восстановление голографических изображений, частота среза, оптическое поле зрения, числовая апертура, спектральная ширина, диафрагма

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки

Для цитирования: Федоров А. Г., Жондорова Л. Л., Федорова Л. К. Методы оценки и анализа разрешающей способности цифровых голографических микроскопов. *Вестник СВФУ*. 2025, Т. 22, № 3. С. 55–69. DOI: 10.25587/2222-5404-2025-22-3-55-69

Original article

Method for estimating and analyzing the resolution of digital holographic microscopy

Artur G. Fedorov ✉, Lyubov L. Zhondorova, Lyubov K. Fedorova

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

✉ ag.fedorov@s-vfu.ru

Abstract

This study presents a comprehensive numerical approach for evaluating and analyzing the resolution of digital holographic microscopes. The analysis focuses on five key factors that have the greatest impact on image reconstruction quality: object-to-sensor distance, temporal and spatial coherence of the illumination source, physical pixel size of the detector, and the optical field of view (FOV). For each of these factors, numerical modeling algorithms were developed and integrated into a unified software platform that enables systematic analysis without the need for physical experiments. This is particularly relevant for the development of compact and low-cost digital holographic microscopes. A wave propagation model based on the angular spectrum method was implemented, and simulations were conducted for a typical holographic microscope configuration. Validation of the results and resolution assessment were carried out using the USAF 1951 resolution target. It was found that the most significant limitations are associated with pixel size, object-to-sensor distance, and the size of the reconstruction area. Coherence properties of the source also affect resolution but can often be compensated for during the design phase. It is demonstrated that the developed algorithm enables preliminary estimation of the theoretical resolution limit for a given system configuration and identification of dominant constraints. The scientific novelty of this work lies in the integration of all major resolution-related factors into a single computational environment, enabling numerical optimization of digital holographic microscope parameters during the design stage. The proposed approach can be applied in the development of portable holographic microscopes for applications in biomedicine, microplastic monitoring, and other practical domains.

Keywords: in-line holography, digital holographic microscopy, resolution, coherence, numerical reconstruction of holographic images, cut-off frequency, optical field of view, numerical aperture, spectral bandwidth, diaphragm

Funding. No funding was received for writing this manuscript

For citation: Fedorov A. G., Zhondorova L. L., Fedorova L. K. Method for estimating and analyzing the resolution of digital holographic microscopy. *Vestnik of NEFU*. 2025, Vol. 22, No. 3. Pp. 55–69. DOI: 10.25587/2222-5404-2025-22-3-55-69

Введение

Голографическая микроскопия, благодаря простоте оптической схемы и возможности компактной реализации, получила широкое распространение и в настоящее время рассматривается как перспективный метод исследования структуры различных объектов [1–4]. Кроме того, она активно применяется для мониторинга параметров окружающей среды, включая определение содержания атмосферной пыли [5–7] и выявление микропластика [8, 9]. Также данный метод

находит применение в биомедицинских исследованиях [10, 11] и в материаловедении [12–14], что свидетельствует о его междисциплинарной значимости. Следует особо отметить возможность применения метода для наблюдения динамических процессов в реальном времени [15, 16].

Одним из ключевых преимуществ данного метода является его универсальность. Другими словами, голографическая микроскопия ограничена в первую очередь длиной волны используемого источника когерентных волн, что обеспечивает широкие возможности для адаптации метода к различным диапазонам электромагнитного спектра. Это делает возможным применение голографических схем как в электронной голографии [2], так и в оптической [17].

Несмотря на значительный прогресс в области голографической микроскопии, достижение оптимальной разрешающей способности по-прежнему остаётся одной из ключевых и актуальных задач, определяющих направление дальнейшего развития технологии.

Для оптических методов визуализации, включая голографическую микроскопию, одной из фундаментальных задач остается достижение высокой разрешающей способности [18]. Особое внимание уделяется разработке подходов, позволяющих приблизиться к дифракционному пределу, а в ряде случаев – и превзойти его за счет использования алгоритмических решений [19]. В этом контексте актуальными являются алгоритмические методы численного восстановления, включая методы сверхразрешения [19, 20], машинного обучения [11], а также алгоритмы, основанные на оптимизации фазовой информации [21].

Следует отметить, что во многих практических применениях, особенно в задачах, связанных с созданием компактных и доступных устройств, целью является не достижение предельного разрешения, а обеспечение достаточного качества изображения для решения прикладной задачи. В таких случаях ключевыми факторами становятся технологичность, стоимость, простота сборки и скорость работы системы. При этом параметрическая оптимизация конфигурации голографического микроскопа с учётом этих ограничений приобретает особую актуальность. Таким образом, наряду с развитием методов повышения разрешающей способности, важной задачей остаются оценка и анализ разрешающей способности в зависимости от параметров конкретной системы, что позволяет обоснованно выбирать оптимальные режимы работы без необходимости проведения физического эксперимента.

Среди множества параметров, определяющих разрешающую способность цифрового голографического микроскопа, ключевыми являются пять физических факторов: расстояние между объектом и детектором, временная когерентность источника, пространственная когерентность, размер пикселя сенсора и ограниченный размер области восстановления. Данные параметры оказывают комплексное влияние на воспроизводимость высокочастотных компонент изображения и, как следствие, на предельное пространственное разрешение системы. Их систематическое рассмотрение было предложено в работе Zhang [22], в которой для каждого из факторов были выведены соответствующие передаточные функции, позволяющие количественно оценить вклад каждого ограничения. Настоящее исследование основывается на модели, предложенной в [22] и направлено на разработку единого программного модуля, реализующего численную оценку разрешающей способности цифрового голографического микроскопа в зависимости от параметров конкретной конфигурации.

Предложенный программный инструмент позволяет варьировать каждый из пяти ключевых факторов (в том числе расстояние между объектом и детектором, диаметр источника, ширину спектральной линии, размер пикселя и размер

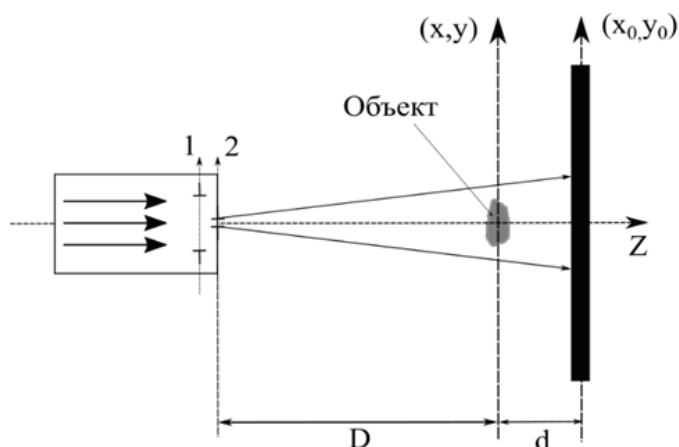


Рис. 1. Принципиальная схема цифрового голографического микроскопа
Fig. 1. Schematic diagram of a digital holographic microscope

области реконструкции) и автоматически рассчитывать предельное разрешение, а также определять, какой из факторов в конкретных условиях является лимитирующим. Такой подход обеспечивает возможность исследования ограничений системы без необходимости проведения физических экспериментов, что существенно упрощает этапы проектирования и оптимизации голографического микроскопа.

Методы исследования

В рамках работы в качестве исходной конфигурации цифрового голографического микроскопа рассматривается схема, ранее реализованная авторами в работе [17]. Принципиальная схема, рассматриваемая в рамках данной работы, представлена на рис. 1, где D – расстояние источник-объект, d – расстояние объект-экран. В плоскости (x, y) расположен объект, в плоскости (x_0, y_0) расположен экран.

Схема, представленная на рис. 1, отличается от конфигурации, рассмотренной в работе [17], введением элементов, учитывающих когерентные свойства источника излучения. В частности, в рассматриваемой схеме дополнительно включены полосовой фильтр и диафрагма с малым отверстием, обозначенные на рис. 1 как плоскости 1 и 2 соответственно, обеспечивающие управление временной и пространственной когерентностью.

Временная когерентность может быть численно описана следующим выражением [22]:

$$C_{\text{tmp}} = \text{sinc}\left(\frac{d}{2\alpha}|u|^2\right), \quad (1)$$

где α – ширина спектральной линии, $|u|$ – модуль пространственной частоты. Отметим, что чем уже спектр (меньше α), тем выше временная когерентность. Как видно из выражения, увеличение d или α приводит к потерям высокочастотной информации и, как следствие, ухудшению разрешения. Стандартным источником излучения для цифровых голографических микроскопов являются полупроводниковые лазеры (Laser Diode, LD), обладающие, как правило, сравнительно узкой спектральной линией (порядка 4 нм). Однако у недорогих коммерческих моделей данный параметр может существенно отличаться, что приводит к снижению временной когерентности и, как следствие, ограничивает разрешающую способность системы.

В соответствии с моделью теоретическое разрешение можно оценить как [22]:

$$q_{\text{tmp}} = \sqrt{\frac{d\alpha}{8}}. \quad (2)$$

Пространственную когерентность можно количественно описать с помощью следующего выражения [22]:

$$C_{\text{spt}} = \frac{J_1\left(\frac{\pi d\beta}{D}|u|\right)}{|u|}, \quad (3)$$

где J_1 – функция Бесселя первого рода, β – диаметр диафрагмы с малым отверстием, определяющий эффективный размер источника. Из выражения следует, что уменьшение диаметра источника, приближая его к точечному, приводит к увеличению пространственной когерентности, что, в свою очередь, способствует повышению разрешающей способности системы. Также следует отметить, что чем больше D , тем уже эффективный размер освещающей апертуры и тем выше разрешение. Также следует отметить, что при увеличении D угловой размер источника, видимый из точки объекта, уменьшается, что приводит к повышению пространственной когерентности, способствующей улучшению разрешающей способности системы. Теоретическое разрешение при учете пространственной когерентности [22]:

$$q_{\text{spt}} = \frac{\pi}{7.6} \frac{d\beta}{D}. \quad (4)$$

В реальных условиях расстояние D ограничено конструктивными соображениями. В частности, при создании компактных цифровых голографических микроскопов на базе Raspberry Pi и миниатюрных лазерных модулей, как показано в работе [17], это расстояние, как правило, не превышает 50 мм. Несмотря на то, что увеличение D может положительно сказаться на пространственной когерентности, дальнейшее его наращивание становится нецелесообразным из-за потери компактности системы.

Кроме когерентных характеристик источника, значительное влияние на разрешающую способность оказывают конструктивные параметры цифрового голографического микроскопа, в частности, расстояние между объектом и плоскостью регистрации d , а также размер пикселя сенсора p . Оба эти параметра ограничивают верхнюю пространственную частоту, доступную для восстановления изображения. При выборе малых значений d (1–3 мм) интенсивность и фаза оптического поля изменяются плавно, с незначительными осцилляциями, что упрощает процесс численного восстановления. Однако с ростом расстояния d наблюдаются более выраженные осцилляции, появляются участки с низкой модуляцией (так называемые «нулевые зоны»), что затрудняет восстановление полной информации об объекте (на практике чаще всего $d \cong 3$ мм). Разрешающая способность, обусловленная физическими размерами пикселя, определяется как $q_{px} = p$. В рамках настоящего исследования оба этих параметра зафиксированы на уровне, соответствующем характеристикам используемого сенсора и конструкции установки, описанной в работе [17].

Одним из ключевых отличий цифровых голографических микроскопов от классических оптических систем является возможность совмещения оптического поля зрения (FOV) с высокой числовой апертурой (Numerical Aperture, NA), что в традиционной оптике считается взаимоисключающими параметрами.

Это достигается за счет отсутствия объектива между объектом и сенсором. Однако на практике, вследствие ограничений вычислительных ресурсов, часто используется разбиение голограммы на несколько подобластей, что может повлиять на разрешающую способность. Влияние ограниченного размера области восстановления описывается следующим выражением [22]:

$$q_{FOV} = \frac{\lambda \sqrt{4D^2 + \Delta L^2}}{2\Delta L}, \quad (5)$$

где λ – длина волны, ΔL – длина стороны восстанавливаемой области. Из данного соотношения следует, что для достижения высокого разрешения необходимо увеличивать ΔL , однако это сопровождается ростом требований к памяти и времени расчёта, что создаёт компромисс между качеством и практической реализуемостью метода. Например, при параметрах, близких к использованным в настоящей работе ($\lambda=0.632$ мкм, $D = 500$ мкм, $\Delta L=1024$ мкм), $q_{FOV} \approx 0.436$ мкм, что соответствует высокому уровню разрешения. В этом случае деление на подобласти оказывается избыточным.

Численное моделирование распространения волны реализуется в рамках метода углового спектра [23].

В рамках работы объектом служит USAF 1951 [24]. Она представляет собой совокупность групп с шестью элементами в каждой, содержащими чередующиеся темные и светлые полосы с различной пространственной частотой (рис. 2).

Каждая группа состоит из шести элементов, обозначаемых номерами от 1 до 6. Нумерация элементов на рис. 2 начинаются с «-2», группы с нечетными номерами располагаются на изображении сверху справа и содержат элементы, идущие по порядку сверху вниз. Группы с четными номерами начинаются внизу справа, где расположен первый элемент, а элементы 2–6 размещаются слева от него. Разрешающая способность конкретного элемента определяется выражением [24]:

$$Resolution_{lp/mm} = 2^{G + \frac{(E-1)}{6}}, \quad (6)$$

где G – номер группы, E – номер элемента в группе (от 1 до 6). С учетом этого разрешение можно определить, как [24]:

$$q = \frac{500}{2^{G + \frac{(E-1)}{6}}}. \quad (7)$$

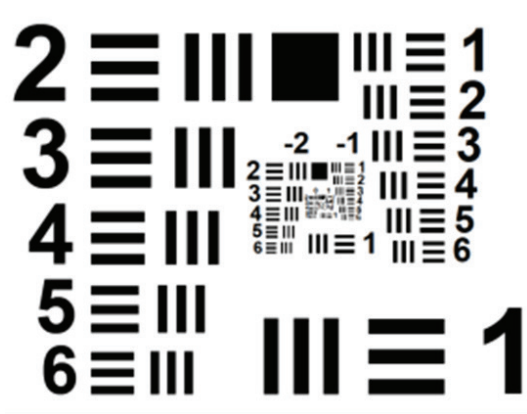


Рис. 2. Мишень USAF 1951
Fig. 2. USAF 1951 Resolution Test Target

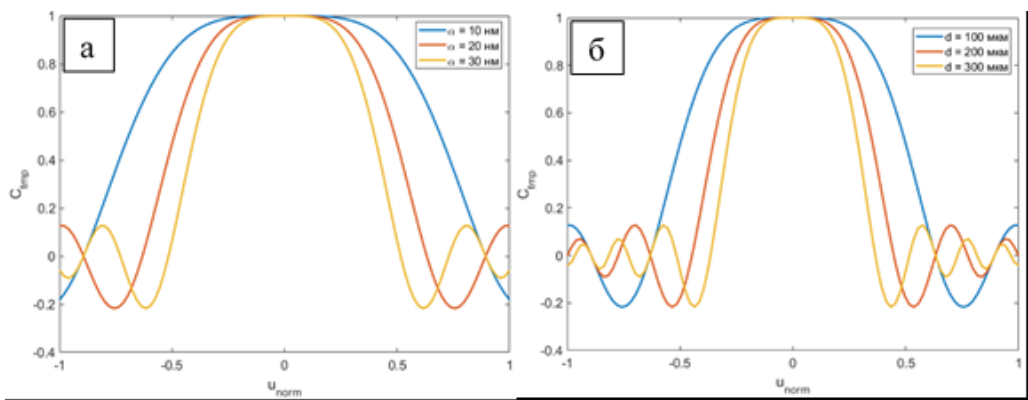


Рис. 3. Зависимость C_{tmp} : а) от α при фиксированном d ; б) от d при фиксированном α
Fig. 3. Dependence of C_{tmp} : а) on α at a fixed d ; б) on d at a fixed α

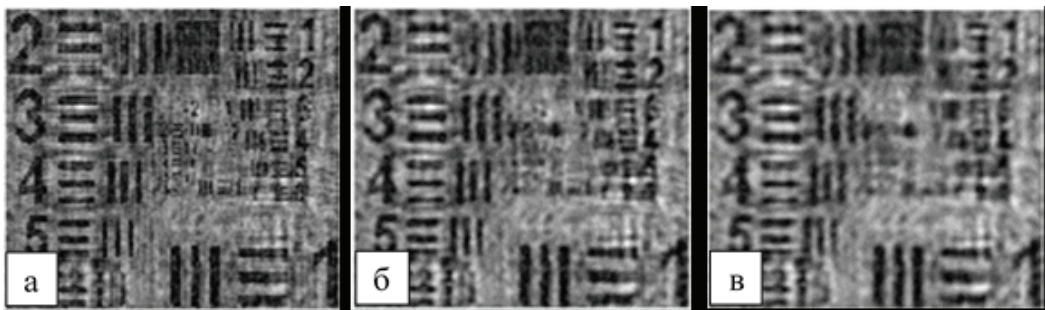


Рис. 4. Восстановленные изображения при: а) $\alpha = 1$ мкм;
б) $\alpha = 40$ мкм; в) $\alpha = 80$ мкм
Fig. 4. Reconstructed images under: а) $\alpha = 1 \mu m$;
б) $\alpha = 40 \mu m$; в) $\alpha = 80 \mu m$

Результаты

Рассмотрим схему, представленную на рис. 1. Как было отмечено выше, моделирование распространения волны и восстановление реализуется в рамках метода углового спектра. Входные параметры: $\lambda = 0.632 \text{ мкм}$, $d = [100, 200, 300] \text{ мкм}$, $\alpha = [10, 20, 30] \text{ нм}$. На рис. 3 представлены два случая: зависимость выражения (1) от α при фиксированном d и от d при фиксированном α , u_{norm} – нормированная пространственная частота по длине волны.

Как видно из рис. 3а, чем шире спектр (больше α), тем быстрее убывает передаточная функция (1) и раньше достигается частота среза (cut-off frequency). Это означает, что высокочастотные компоненты изображения становятся недоступными, что снижает разрешение. Уменьшение d (рис. 3б) сдвигает частоту среза вправо, расширяя полосу пропускания, тем самым улучшая разрешение. Таким образом, при постоянной α уменьшение d позволяет сохранить высокочастотную информацию, но, как было сказано ранее, на практике чаще всего $d \cong 3 \text{ м}$.

На рис. 4 представлен результат моделирования распространения волны при следующих входных параметрах: $\lambda = 0.5 \text{ мкм}$, $N = 128$ – размерность двумерного массива, $d = 0.08 \text{ метр}$. Большое расстояния d обусловлено тем, чтобы показать явную динамику ухудшения разрешения.

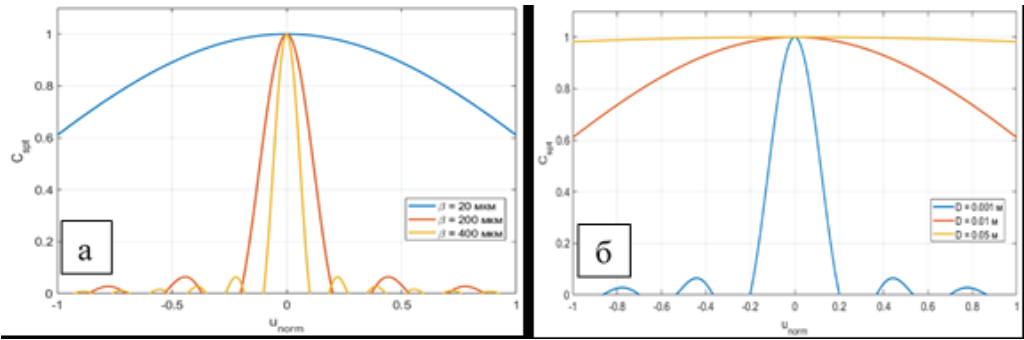


Рис. 5. Зависимость C_{spt} : а) от β при фиксированном D ; б) от D при фиксированном β
Fig. 5. Dependence of C_{spt} : а) on β at a fixed D ; б) on D at a fixed β

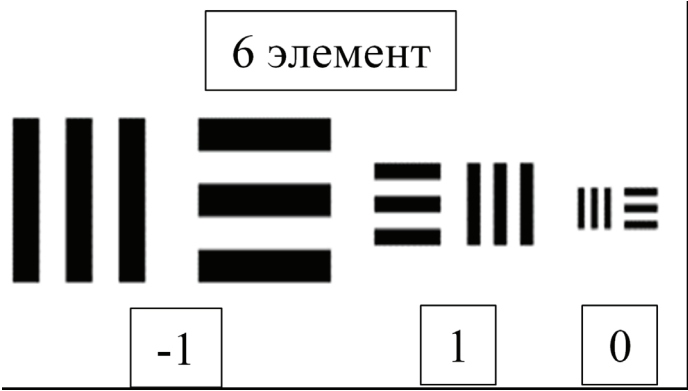


Рис. 6. Элементы 6 из групп -1, 1, 0
Fig. 6. Elements 6 from groups -1, 1, 0

Из рис. 5 видно, что при увеличении диаметра апертуры β функция пространственной когерентности C_{spt} убывает быстрее, что указывает на снижение способности системы передавать высокие пространственные частоты и, как следствие, на ухудшение разрешения. В то же время аналогично случаю с временной когерентностью увеличение расстояния от источника до объекта d при фиксированной β приводит к росту пространственной когерентности, сдвигая границу пропускания к более высоким частотам и тем самым способствуя улучшению разрешения.

Для наглядной демонстрации влияния пространственной когерентности на разрешение были использованы элементы 6 из групп -1, 1 и 0 (рис. 6).

Моделирование распространения волны и восстановление изображения осуществлялись при следующих параметрах: длина волны $\lambda = 0.5 \text{ мкм}$, размер двумерного массива $N = 3000$, расстояние от объекта до экрана $d = 0.15 \text{ м}$. Для анализа влияния пространственной когерентности использовалась величина β , характеризующая ширину области когерентности. На рис. 7 представлены восстановленные изображения объекта при различных значениях β : от практически полной пространственной когерентности ($\beta = 1 \text{ мкм}$) до значительно сниженной ($\beta = 1000 \text{ мкм}$).

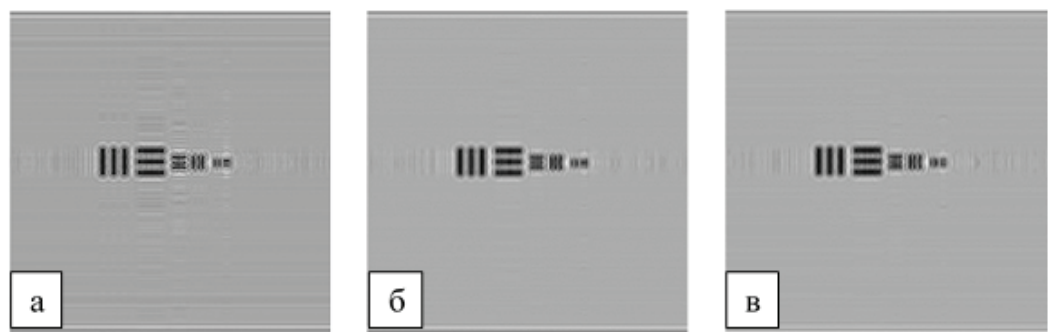


Рис. 7. Восстановленные изображения при: а) $\beta = 1$ мкм;
б) $\beta = 100$ мкм; в) $\beta = 1000$ мкм

Fig. 7. Reconstructed images under: а) $\beta = 1 \mu m$;
б) $\beta = 40 \mu m$; в) $\beta = 80 \mu m$

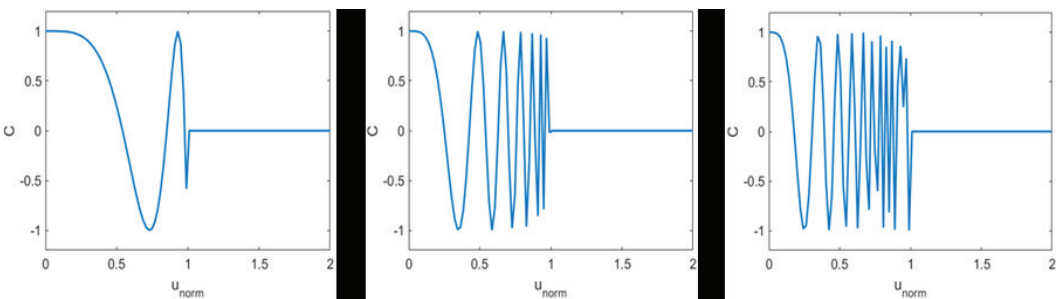


Рис. 8. Анализ осцилляций при значениях $d = 1, 5, 10$ мкм (слева направо)

Fig. 8. Analysis of oscillations at $d = 1, 5, 10 \mu m$ (left to right)

С ростом β наблюдается увеличение степени пространственной некогерентности, что приводит к размазыванию и размытию высокочастотных деталей изображения. Однако при больших значениях N различия между изображениями становятся менее выраженными визуально.

При фиксированной ширине спектра источника уменьшение расстояния d между объектом и сенсором способствует расширению эффективной апертуры, что приводит к улучшению разрешающей способности системы.

Для демонстрации зависимости разрешения от d рассмотрена следующая модель [22]:

$$C = \cos\left(k * d \left(1 - \sqrt{1 - u^2}\right)\right), \quad (8)$$

где $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число. Численная реализация выражения (8) представлена на рис. 8. Как видно из рис. 8, при малых значениях d (около 1–2 мкм) передаточная функция амплитудных значений остается относительно гладкой, с незначительными осцилляциями, что облегчает восстановление изображения.

С увеличением расстояния d осцилляции становятся более частыми, появляются области с нулевым откликом, что затрудняет восстановление амплитуды и фазы объекта. С практической точки зрения минимальное расстояние ограничено конструктивными особенностями системы (например, толщиной подложки) и, как правило, составляет порядка 100 мкм. Это значение не позволяет достичь дифракционного предела разрешения в условиях однократной регистра-

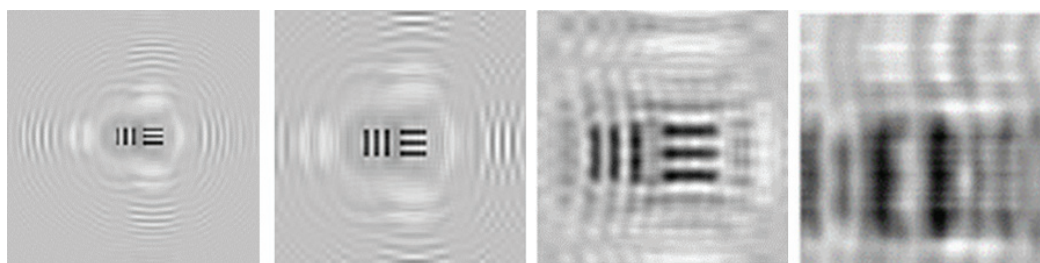


Рис. 9. Восстановленные изображения при различных значениях FOV:

$\Delta L = 0.001, 0.0001, 0.00005, 0.00003$, м (слева направо)

Fig. 9. Reconstructed images at different FOV values

$\Delta L = 0.001, 0.0001, 0.00005, 0.00003$, m (left to right)

ции. В работе [25] рассматривается подход, при котором регистрация голограмм при нескольких значениях d позволяет существенно снизить влияние дифракции и улучшить качество восстановления при больших расстояниях между объектом и экраном. Однако в рамках нашей конфигурации реализация данного метода технически невозможна, поскольку система не предусматривает возможность многократной съемки на различных расстояниях d .

Ключевым фактором, ограничивающим разрешающую способность системы, является физический размер пикселя. Он напрямую определяет максимально регистрируемую пространственную частоту и, как следствие, влияет на предельное разрешение изображения. Существует подход, позволяющий повысить разрешающую способность за счет многократной регистрации голограмм с субпиксельными смещениями или при различных условиях освещения [26]. Такие методы позволяют синтезировать голограмму с меньшим эффективным размером пикселя и улучшенным откликом, в том числе по фазе. Однако в рамках данной работы данные техники не применялись ввиду конструктивных ограничений и невозможности реализации многокадровой регистрации в существующей конфигурации микроскопа.

Для анализа влияния размера FOV на качество восстанавливаемого изображения рассматривался элемент 6 из группы 0. Численное моделирование проводилось при разрешении $N = 5000$, длине волны $\lambda = 0.5$ мкм, $d = 0.08$ м, размер области $L = 0.002$ м. На рис. 9 представлены восстановленные изображения при различных значениях ΔL . По мере уменьшения ΔL наблюдается заметное снижение разрешающей способности: исчезают высокочастотные детали, усиливаются артефакты и размытие изображения. Это связано с ограничением регистрируемого спектра пространственных частот: чем меньше область, тем уже поддерживаемая апертура, а значит и ниже предельное разрешение. Таким образом, для адекватного воспроизведения высокочастотных деталей объекта необходимо использовать как можно более широкое FOV, что, в свою очередь, увеличивает вычислительные затраты.

Заключение

В рамках настоящей работы был разработан единый программный инструмент для численного моделирования и анализа разрешающей способности цифровых голографических микроскопов на основе пяти ключевых факторов: расстояния между объектом и сенсором, временной и пространственной когерентности источника излучения, размера пикселя сенсора и размера области восстановления изображения (FOV).

Численное моделирование позволило выявить и количественно оценить влияние каждого из указанных факторов на итоговое разрешение голографической системы без необходимости проведения физических экспериментов. Установлено, что наибольшее ограничение разрешающей способности в типовых конфигурациях цифрового голографического микроскопа связано с размерами пикселя сенсора, расстоянием между объектом и экраном, а также ограничением размера области восстановления.

Показано, что временная и пространственная когерентности оказывают значительное, но менее критичное влияние по сравнению с конструктивными параметрами сенсора и геометрией системы. В частности установлено, что даже небольшое ухудшение когерентных характеристик источника приводит к потере высокочастотных деталей изображения и снижению общей разрешающей способности.

Предложенный численный подход позволяет оперативно и без дополнительных аппаратных затрат проводить оптимизацию конфигурации цифровых голографических микроскопов на стадии проектирования. Научная новизна работы заключается в комплексном объединении всех указанных факторов в единой программной среде, что обеспечивает возможность предварительной оценки и выбора оптимальных параметров системы.

Дальнейшее развитие работы предполагает экспериментальную проверку полученных численных результатов и реализацию предложенного метода для решения конкретных прикладных задач, таких как мониторинг микропластика и биомедицинские исследования, с целью подтверждения практической значимости предложенного подхода.

Л и т е р а т у р а

1. Егоров Н.В., Антонова Л.И., Карпов А.Г. и др. Теоретическая и экспериментальная оценки электрических параметров голографического микроскопа. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2020;(10):79-84. DOI: 10.31857/S1028096020100040
2. Egorov NV, Karpov AG, Fedorov AG, et al. Technique for investigating the spatial structure of thin films at a nanolevel. *Journal of surface investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques*. 2011;5(5):992-995. DOI: 10.1134/S1027451011100089
3. Amann S, Witzleben M, Breuer S. 3D-printable portable open-source platform for low-cost lens-less holographic cellular imaging. *Scientific Reports*. 2019;(9):11260. DOI: 10.1038/s41598-019-47689-1
4. Kumar ShM, Hong J. A review of 3D particle tracking and flow diagnostics using digital holography. *Measurement science and technology*. 2025;36(3):032005. DOI: 10.1088/1361-6501/adabff
5. Nicholas BF, Lei F, Jiarong H. Holographic Air-Quality Monitor (HAM). *Indoor Air*. 2024;(1):2210837. DOI: 10.1155/2024/2210837.
6. Kim J, Go T, Lee S. J. Volumetric monitoring of airborne particulate matter concentration using smartphone-based digital holographic microscopy and deep learning. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;(418):126351. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126351
7. Kempainen O, Laning JC, Mersmann RD, et al. Imaging atmospheric aerosol particles from a UAV with digital holography. *Scientific Reports*. 2020;(10):16085. DOI: 10.1038/s41598-020-72411-x
8. Cacace T, Del-Coco M, Carcagnì P, et al. HMPD: A novel dataset for microplastics classification with digital holography. *Lecture Notes in Computer Science. In: Image Analysis and Processing*. 2023:123-133. DOI: 10.1007/978-3-031-43153-1_11
9. Yuxing Li, Yanmin Zhu, Jianqing H, et al. High-throughput microplastic assessment using polarization holographic imaging. *Scientific Reports*. 2024;(14):2355. DOI: 10.1038/s41598-024-52762-5

10. Kim MK. Applications of digital holography in biomedical microscopy. *Journal of the Optical Society of Korea*. 2010;14(2):77-89. DOI: 10.3807/JOSK.2010.14.2.077
11. Anayet UD, Abdul BA, Muzafar B, et al. Applications of artificial intelligence and digital holography in biomedical microscopy. *Authorea*. 2023;28. DOI: 10.22541/au.167698220.02553258/v1
12. Lu H, Zhang Ch, Xu W, et al. Detection of ceramic stress intensity factor based on digital holography. *Applied Optics*. 2025;64(4):910-916. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.545843>
13. Daniel RC, Cosme F. High-resolution imaging for in-situ non-destructive testing by quantitative lensless digital holography. *Frontiers in Photonics*. 2024;(5):1351744. DOI: 10.3389/fphot.2024.1351744
14. Wang Zh, Miccio L, Coppola S, et al. Digital holography as metrology tool at micro-nanoscale for soft matter. *Light: Advanced Manufacturing*. 2022;3(1):151-176. DOI: 10.37188/lam.2022.010
15. Kim J, Kim Y, Lee HS, et al. Single-shot reconstruction of three-dimensional morphology of biological cells in digital holographic microscopy using a physics-driven neural network. *Nature Communications*. 2024;(16):4840. DOI: 10.1038/s41467-025-60200-x
16. Tang M, He H, Yu L. Real-time 3D imaging of ocean algae with crosstalk suppressed single-shot digital holographic microscopy. *Biomedical Optics Express*. 2022;13(8):4455-4467. DOI: 10.1364/BOE.463678
17. Федоров А.Г., Платонов В.В., Жондорова Л.Л. и др. Разработка модели цифрового голографического микроскопа для исследования структур в оптическом диапазоне. *Вестник СВФУ*. 2024;21(2):77-83. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-2-77-83.
18. Pen G, Caojin Y. Resolution enhancement of digital holographic microscopy via synthetic aperture: a review. *Light: Advanced Manufacturing*. 2022;3(1):105-120. DOI: 10.37188/lam.2022.006
19. Kobi A, Peng G, Vismay T. Optical super-resolution imaging: A review and perspective. *Optics and Lasers in Engineering*. 2024;(183):108536. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2024.108536
20. Jayakumar N, Ahluwalia BS. From superior contrast to super resolution label free optical microscopy. *npj Imaging*. 2025;3(1):1-16. DOI: 10.1038/s44303-024-00064-w
21. Huang Zh, Cao L. Quantitative phase imaging based on holography: trends and new perspectives. *Light: Science & Applications*. 2024;3(1):145. DOI: 10.1038/s41377-024-01453-x
22. Zhang J, Sun J, Chen Q, Zuo Ch. Resolution analysis in a lens-free on-chip digital holographic microscope. *IEEE Transactions on Computational Imaging*. 2020;(6):697-710. DOI: 10.1109/TCI.2020.2964247
23. Федоров А.Г., Трофимов В. В., Карпов А. Г. Численные методы и алгоритмы восстановления голографических изображений с произвольным выбором физических размеров плоскости объекта и наблюдения. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. 2022;18(1):99-110. DOI: 10.21638/11701/spbu10.2022.108
24. Scott C, Potsaid B, Wen JT. Wide field scanning telescope using MEMS deformable mirrors. *International Journal of Optomechatronics*. 2010;4(3):285-305. DOI: 10.1080/15599612.2010.513720
25. Wang M, Feng Sh, Wu J. Multilayer pixel super-resolution lensless in-line holographic microscope with random sample movement. *Scientific Reports*. 2017;(7):12791. DOI: 10.1038/s41598-017-13134-4
26. Heejung L, JongWu K, Junwoo K, et al. Noniterative sub-pixel shifting super-resolution lensless digital holography. *Optics Express*. 2021;29(19):29996-30007. DOI: 10.1364/OE.433719

References

1. Egorov NV, Antonova LI, Karpov AG, et al. Theoretical and experimental evaluation of the electrical parameters of a holographic microscope. *Journal of surface investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques*. 2020;(10):79-84 (in Russian). DOI: 10.31857/S1028096020100040
2. Egorov NV, Karpov AG, Fedorov AG, et al. Technique for investigating the spatial structure of thin films at a nanolevel. *Journal of surface investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques*. 2011;5(5):992-995 (in English). DOI: 10.1134/S1027451011100089
3. Amann S, Witzleben M, Breuer S. 3D-printable portable open-source platform for low-cost lens-less holographic cellular imaging. *Scientific Reports*. 2019;(9):11260 (in English). DOI: 10.1038/s41598-019-47689-1
4. Kumar ShM, Hong J. A review of 3D particle tracking and flow diagnostics using digital holography. *Measurement science and technology*. 2025;36(3):032005 (in English). DOI: 10.1088/1361-6501/adabff
5. Nicholas BF, Lei F, Jiarong H. Holographic Air-Quality Monitor (HAM). *Indoor Air*. 2024;(1):2210837 (in English). DOI: 10.1155/2024/2210837.
6. Kim J, Go T, Lee S. J. Volumetric monitoring of airborne particulate matter concentration using smartphone-based digital holographic microscopy and deep learning. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;(418):126351 (in English). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126351
7. Kempainen O, Laning JC, Mersmann RD, et al. Imaging atmospheric aerosol particles from a UAV with digital holography. *Scientific Reports*. 2020;(10):16085 (in English). DOI: 10.1038/s41598-020-72411-x
8. Cacace T, Del-Coco M, Carcagnì P, et al. HMPD: A novel dataset for microplastics classification with digital holography. *Lecture Notes in Computer Science. In: Image Analysis and Processing*. 2023:123-133 (in English). DOI: 10.1007/978-3-031-43153-1_11
9. Yuxing Li, Yanmin Zhu, Jianqing H, et al. High-throughput microplastic assessment using polarization holographic imaging. *Scientific Reports*. 2024;(14):2355 (in English). DOI: 10.1038/s41598-024-52762-5
10. Kim MK. Applications of digital holography in biomedical microscopy. *Journal of the Optical Society of Korea*. 2010;14(2):77-89 (in English). DOI: 10.3807/JOSK.2010.14.2.077
11. Anayet UD, Abdul BA, Muzafar B, et al. Applications of artificial intelligence and digital holography in biomedical microscopy. *Authorea*. 2023:28 (in English). DOI: 10.22541/au.167698220.02553258/v1
12. Lu H, Zhang Ch, Xu W, et al. Detection of ceramic stress intensity factor based on digital holography. *Applied Optics*. 2025;64(4):910-916 (in English). DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.545843>
13. Daniel RC, Cosme F. High-resolution imaging for in-situ non-destructive testing by quantitative lensless digital holography. *Frontiers in Photonics*. 2024;(5):1351744 (in English). DOI: 10.3389/fphot.2024.1351744
14. Wang Zh, Miccio L, Coppola S, et al. Digital holography as metrology tool at micro-nanoscale for soft matter. *Light: Advanced Manufacturing*. 2022;3(1):151-176 (in English). DOI: 10.37188/lam.2022.010
15. Kim J, Kim Y, Lee HS, et al. Single-shot reconstruction of three-dimensional morphology of biological cells in digital holographic microscopy using a physics-driven neural network. *Nature Communications*. 2024;(16):4840 (in English). DOI: 10.1038/s41467-025-60200-x
16. Tang M, He H, Yu L. Real-time 3D imaging of ocean algae with crosstalk suppressed single-shot digital holographic microscopy. *Biomedical Optics Express*. 2022;13(8):4455-4467 (in English). DOI: 10.1364/BOE.463678
17. Fedorov AG, Platonov VV, Zhondorova LL, Fedorova LN. Development of a digital holographic microscope model for the investigate of structures in the optical range. *Vestnik of NEFU*. 2034;21(2):77-83 (in Russian).

18. Pen G, Caojin Y. Resolution enhancement of digital holographic microscopy via synthetic aperture: a review. *Light: Advanced Manufacturing*. 2022;3(1):105-120 (in English). DOI: 10.37188/lam.2022.006
19. Kobi A, Peng G, Vismay T. Optical super-resolution imaging: A review and perspective. *Optics and Lasers in Engineering*. 2024;(183):108536 (in English). DOI: 10.1016/j.optlaseng.2024.108536
20. Jayakumar N, Ahluwalia BS. From superior contrast to super resolution label free optical microscopy. *npj Imaging*. 2025;3(1):1-16 (in English). DOI: 10.1038/s44303-024-00064-w
21. Huang Zh, Cao L. Quantitative phase imaging based on holography: trends and new perspectives. *Light: Science & Applications*. 2024;3(1):145 (in English). DOI: 10.1038/s41377-024-01453-x
22. Zhang J, Sun J, Chen Q, Zuo Ch. Resolution analysis in a lens-free on-chip digital holographic microscope. *IEEE Transactions on Computational Imaging*. 2020;(6):697-710 (in English). DOI: 10.1109/TCI.2020.2964247
23. Fedorov AG, Trofimov VV, Karpov AG. Numerical methods and algorithms for reconstruction of holographic images with flexibility choice of physical size of the object and observation area. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*. 2022;18(1):99-110 (in Russian). DOI: 10.21638/11701/spbu10.2022.108
24. Scott C, Potsaid B, Wen JT. Wide field scanning telescope using MEMS deformable mirrors. *International Journal of Optomechatronics*. 2010;4(3):285-305 (in English). DOI: 10.1080/15599612.2010.513720
25. Wang M, Feng Sh, Wu J. Multilayer pixel super-resolution lensless in-line holographic microscope with random sample movement. *Scientific Reports*. 2017;(7):12791 (in English). DOI: 10.1038/s41598-017-13134-4
26. Heejung L, JongWu K, Junwoo K, et al. Noniterative sub-pixel shifting super-resolution lensless digital holography. *Optics Express*. 2021;29(19):29996-30007 (in English). DOI: 10.1364/OE.433719

Сведения об авторах

ФЕДОРОВ Артур Григорьевич – к. т. н., доц. каф. теоретической физики, ФТИ, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», ORCID: 0000-0002-8905-9564, г. Якутск, Российская Федерация, e-mail: ag.fedorov@s-vfu.ru

ЖОНДОРОВА Любовь Леонидовна – студент 4 курса, группы Ф-21-1 ФТИ, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», г. Якутск, Российская Федерация

ФЕДОРОВА Любовь Константиновна – ведущий инженер кафедры теоретической физики, ФТИ, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», г. Якутск, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-3569-7592, e-mail: flk_84@mail.ru

About the authors

Artur G. FEDOROV – Cand. Sci. (Technology), Associate Professor, Department of Theoretical Physics, Institute of Physics and Technologies, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-8905-9564, e-mail: ag.fedorov@s-vfu.ru

Lyubov L. ZHONDOROVA – 4th year Undergraduate Student, Institute of Physics and Technologies, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

Lyubov K. FEDOROVA – Leading Engineer, Department of Theoretical Physics and Technologies, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-3569-7592, e-mail: flk_84@mail.ru

Вклад авторов

Федоров Артур Григорьевич – разработка концепции, методология, программное обеспечение, проведение исследования, администрирование данных, редактирование рукописи, руководство исследованием, администрирование проекта

Жондорова Любовь Леонидовна – создание черновика рукописи, визуализация

Федорова Любовь Константиновна – ресурсное обеспечение исследования, верификация данных, проведение статистического анализа.

Authors' contribution

Artur G. Fedorov – conceptualization, methodology, software, investigation, data curation, writing - review & editing, supervision, project administration

Lyubov L. Zhondorova – writing - original draft, visualization

Lyubov K. Fedorova – resources, validation, formal analysis

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests

The authors declare no relevant conflict of interests

Поступила в редакцию / Submitted 19.05.25

Принята к публикации / Accepted 11.06.25