

УДК 535.417; 681.785.57

ЦИФРОВОЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕРФЕРОГРАММ

© Н. С. Балбекин¹, В. Ю. Венедиктов^{2,3}, Д. В. Венедиктов¹,
Н. В. Петров¹, Р. С. Коновалов², С. А. Пулькин³, А. А. Севрюгин²,
И. Турсунов², В. И. Шоев¹

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики,
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В. И. Ульянова (Ленина),
197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

³ Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–3
E-mail: vlad.venediktov@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований и схемы записи голограмм цифровым способом с использованием пространственных модуляторов света. Описано применение голографических интерференционных методов для измерения неровностей наномасштаба на примере наноступеньки (высотой 70 нм и шириной 30 мкм). Приведены примеры реализации метода увеличения чувствительности для измерений наноступеньки и метода крюков цифровым способом. Доказана вероятность реализации метода коррекции внутренних искажений системы в интерферометре. Показано, что применение голографических интерференционных методов с использованием цифровой обработки голограмм позволяет повысить чувствительность интерферограмм без потери основной информации об объекте и без увеличения точности измерений.

Ключевые слова: пространственный модулятор света, голограмма, крюки Рождественского, голографическая интерферометрия, коррекция искажений, усиление интерферограмм, нанометрология.

DOI: 10.15372/AUT20200211

Введение. В настоящее время цифровая голографическая интерферометрия представляет большие возможности для изучения незначительных фазовых неоднородностей при отражении от границ твёрдых объектов, жидкостей или газовых сред, проведения топографии поверхностей с перепадом высот менее нескольких нанометров. Для цифровой записи таких голограмм оказались эффективными методы, предложенные в [1–3, 4] и применённые в [5–8]. Для первичной записи таких голограмм в данной работе предложен интерферометр Майкельсона, в одно из плеч которого устанавливался изучаемый объект. Так, в работе [9] в качестве объекта была взята наноступенька. Затем та же техника была применена для спектральных интерферограмм поглощения газов (пары Rb, пары I₂). Основная идея записи голограмм цифровым способом заключалась в использовании в выходной щели спектрографа на выходе из интерферометра ПЗС-камеры, подключённой к персональному компьютеру. Полученные таким способом интерферограммы в дальнейшем обрабатывались в цифровой форме. Источником служило как непрерывное, так и импульсное когерентное излучение. Во втором случае уместным было бы говорить о комб-спектроскопии [5].

Цель данной работы — исследование возможностей цифровой и компьютерной голографии применительно к развитию техники повышения информативности измерительных интерферограмм с помощью их сложения и усиления.

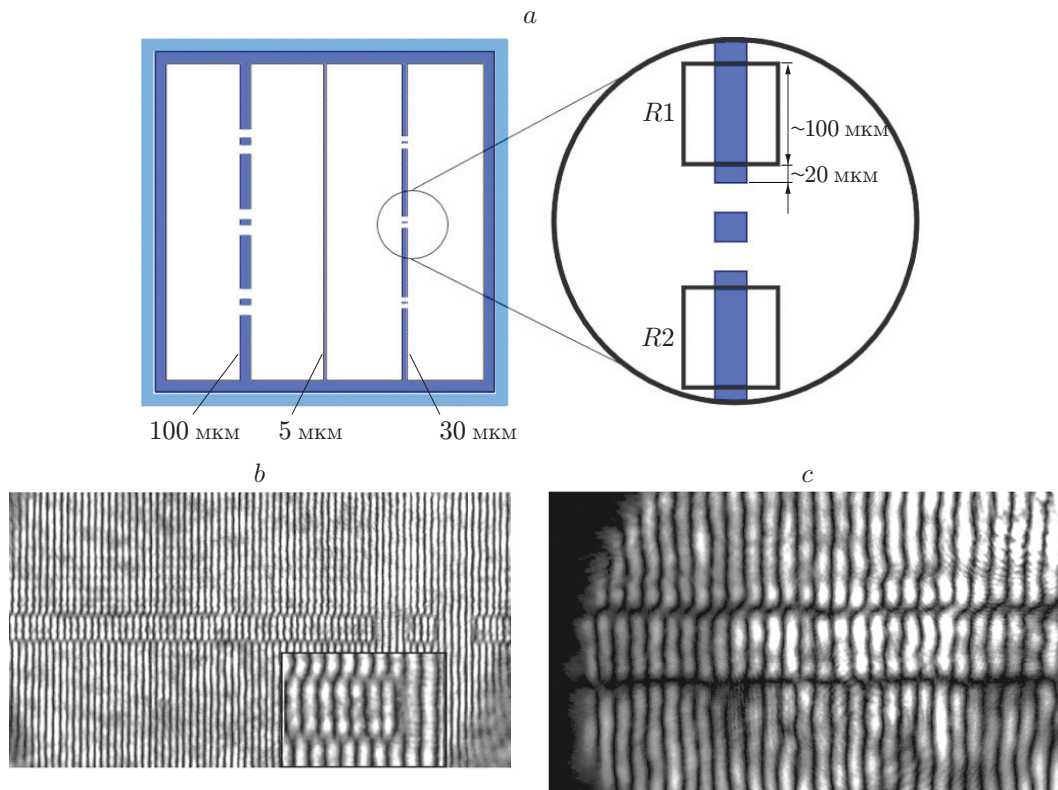


Рис. 1. Объект исследования: *a* — схема объекта (наноступенька), *b* — голограмма объекта, *c* — голограмма с удвоенной чувствительностью

Цифровое увеличение чувствительности голограмм в нанометрологии. Метод голографической интерферометрии с увеличением чувствительности [5] был применён при измерении высоты наноступеньки (от 10 нм и выше) со стандартной неопределённостью 0,5 нм. Начальная интерферограмма получалась в интерферометре Майкельсона с наноступенькой на образце из кремниевой подложки в одном из зеркал интерферометра (рис. 1, *a*). Эта интерферограмма была записана ПЗС-камерой, а цифровая интерференционная картина воспроизводилась на матрице фазового модулятора с пространственным разрешением 30 линий/мм. Оптическая схема лазерного микроинтерферометра показана на рис. 2. Монохроматическое излучение гелий-неонового лазера 1 было расширено телескопической системой 2. В качестве измеряемого объекта использовалась ступенька 5 высотой 70 нм. Наклонное зеркало 4 обеспечивало интерференционные полосы равной ширины на выходе интерферометра.

Интерференционная картина записывалась цифровым микроскопом с разрешением 3488×2616 пикселей. Линзы 6 и 8 вместе с отверстием 7 в промежуточной фокальной плоскости обеспечивали оптимальную пространственную несущую частоту интерферограммы. Оптимальная плотность полос была выбрана около 130 линий/мм. На рис. 1, *b* показана голограмма, полученная с помощью схемы (см. рис. 2). Комплексные амплитуды волн записанной интерферограммы объекта 5 имеют следующий вид:

$$A_1(x, y) = a_1 \exp [i(2\pi\xi x + \varepsilon_1(x, y))], \quad (1)$$

$$A_2(x, y) = a_2 \exp [i(\varepsilon_2(x, y) + \varphi(x, y))]. \quad (2)$$

Здесь (x, y) — плоскость, перпендикулярная оси распространения света z ; a_1 и a_2 — реальные амплитуды объектной и эталонной волн; $\xi = \cos(\alpha/\lambda)$ — пространственная ча-

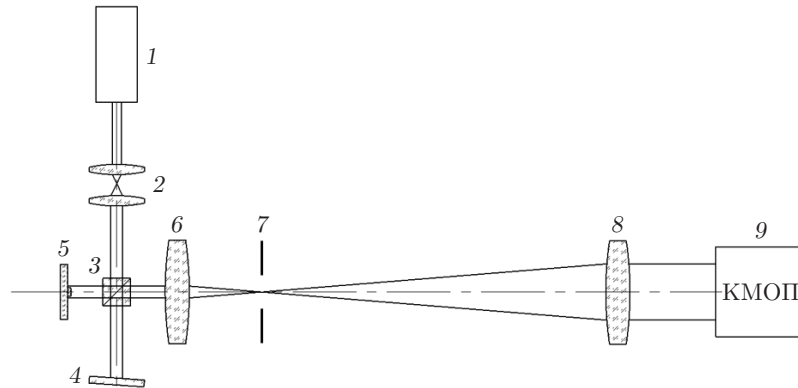


Рис. 2. Оптическая схема цифрового голографического интерферометра (1 — гелий-неоновый лазер, 2 — коллиматор, 3 — делитель пучка, 4 — зеркало, 5 — зеркало с объектом, 6, 8 — линзы, 7 — отверстие, 9 — цифровой микроскоп (КМОП-камера с микрообъективом))

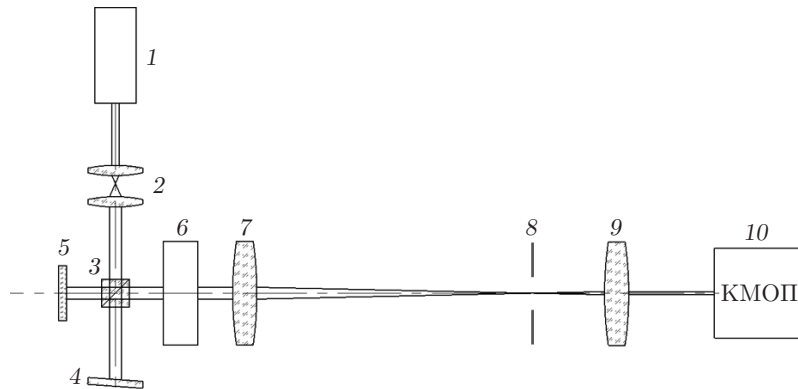


Рис. 3. Оптическая схема для увеличения чувствительности голограммы (1 — гелий-неоновый лазер, 2 — коллиматор, 3 — делитель пучка, 4, 5 — зеркала, 6 — ПМС, 7, 9 — линзы, 8 — отверстие, 10 — цифровой микроскоп (КМОП-камера с микрообъективом))

стота опорной волны; α — угол между эталонной и объектной волнами; λ — длина волны излучения лазера (в данном эксперименте 633 нм); $\varepsilon_1(x, y)$ и $\varepsilon_2(x, y)$ — искажения соответствующих волн, вносимые аберрациями оптической системы; $\varphi(x, y)$ — фаза объектной волны (несущая информацию о ступеньке).

Следующим этапом было увеличение чувствительности данной голограммы. Подробное описание метода, а также ряд примеров его применения в прозрачных средах было представлено в [9]. Цифровые технологии позволили использовать метод в режиме реального времени в очень короткий промежуток времени. На рис. 3 показан вариант схемы с применением пропускающего пространственного модулятора света (ПМС).

В сравнении со схемой на рис. 2 схема на рис. 3 претерпела небольшие изменения. После отражений от зеркал 4 и 5 два пучка интерферировали между собой. На выходе из интерферометра их комплексные амплитуды выглядели следующим образом:

$$B_1(x, y) = a_1 \exp [i(2\pi(\xi_1 x + \eta_1 y) + \varepsilon_1(x, y))],$$

$$B_2(x, y) = a_2 \exp [i(2\pi(\xi_2 x + \eta_2 y) + \varepsilon_2(x, y))],$$

где ξ_1, η_1 и ξ_2, η_2 — пространственные частоты двух волн, определяющие их распространение. Полученная голограмма подавалась на модулятор LC-2002 с разрешением 800×600 пикселей (размер пикселя 32 мкм) и освещалась волнами B_1 и B_2 под определёнными углами. В результате в фокальной плоскости линзы наблюдалось два набора дифракционных картин, воспроизводимых каждой волной в отдельности. Углы и размеры отверстия подбирались с таким условием, чтобы $+n$ -й и $-n$ -й дифракционные порядки из первой и второй дифракционных картин проходили через отверстия. Угол между этими порядками дифракции определял пространственную частоту вторичной интерференционной картины. Её структура соответствовала удвоению разности фаз. Вторая линза системы 9 передавала пучки, прошедшие через отверстия, на цифровой микроскоп. В плоскости КМОП-матрицы комплексные амплитуды волн имели вид

$$C_n(x, y) = a_n \exp [i(\varphi_1 + n(\varphi + \varepsilon))], \quad C_n^*(x, y) = a_n^* \exp [i(\varphi_2 + n(\varphi + \varepsilon))].$$

Следовательно, в плоскости КМОП-матрицы волны C_1 и C_2 образовывали интерференционную картину вида

$$I \simeq 1 + \cos [((\varphi_1 - \varphi_2) + 2n\varphi) + 2n\varepsilon],$$

где I — интенсивность интерференционной картины.

Чувствительность метода голографической интерферометрии определяется как отношение деформации волнового фронта, реконструируемого с голограммы, к её первоначальному значению, создаваемому исследуемым объектом, т. е. увеличение сдвига полос на вторичной интерференционной картине относительно исходной. Вышеописанный метод имеет чувствительность $2n$, где n — порядок дифракции, фильтруемый отверстием. На рис. 1, *c* показан пример восстановленной вторичной голограммы без какой-либо дополнительной фильтрации с выделенными $+1$ -м и -1 -м порядками. Таким образом, чувствительность исходной голограммы была повышена в 2 раза [10].

Цифровое увеличение чувствительности спектроголограмм методом крюков Рождественского. В работе [4] предложено применить цифровое усиление спектроголограмм. Под спектроголограммой будем понимать интерферограмму, записанную вблизи линий поглощения вещества в газообразном состоянии. В качестве таких веществ были использованы пары рубидия и йода [6, 11]. Схема записи голограмм в данной работе не претерпела особых изменений: источником света служило излучение фемтосекундного лазера с длительностью импульса 100 фс при частоте повторения импульсов ~ 80 МГц и длиной волны $\lambda = 780$ нм. Таким образом, источник работал в режиме комб-генератора [6]. На место ступеньки в одно из плеч интерферометра устанавливалась кювета с исследуемым веществом. Комплексные амплитуды волн не изменили своего вида по сравнению с выражениями (1) и (2), а фаза $\varphi(x, y)$ из соотношений (1) и (2) для комплексных амплитуд содержала информацию о силах осцилляторов соответствующих переходов [4].

На рис. 4, *a* показана одна из спектроголограмм, записанных для паров йода с шириной спектральной картины 80 нм с центром 540 нм при температурах 293–373 К. Такая ширина достигалась благодаря генерации белого света (суперконтинуума) с помощью микроструктурированного волокна [9]. Относительно слабые линии поглощения колебательного спектра с начальным колебательным числом $\nu = 0$ (правая часть рис. 4, *a*), характерные для I_2 ввиду малой концентрации паров, приводят к тому, что крюки вблизи таких линий едва заметны. Было выдвинуто предположение, что данная проблема может быть решена методом цифрового усиления голограмм. Следует отметить, что в области длин волн больше 540 нм (левая часть рис. 4, *a*) спектр более сложный из-за возникновения

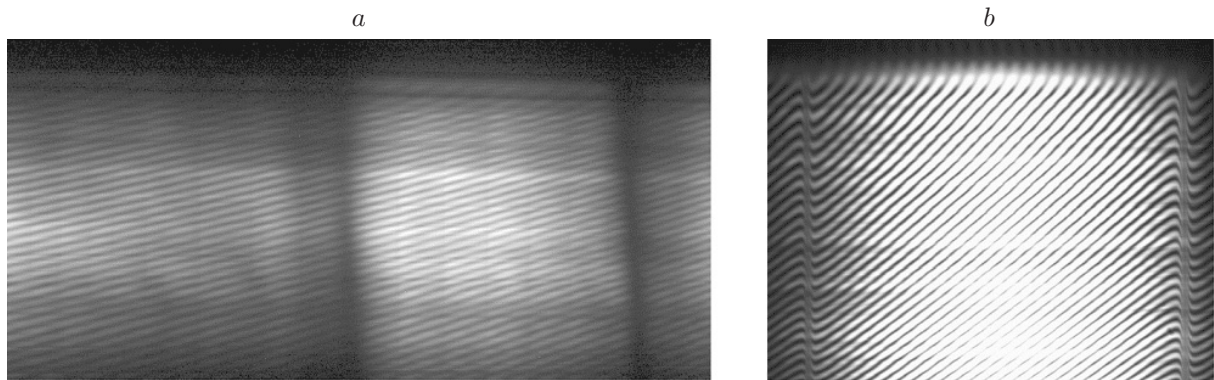


Рис. 4. Образцы полученных спектроголограмм: *a* — для йода I_2 ($\lambda = 780$ нм),
b — для паров рубидия R ($\lambda = 795$ нм)

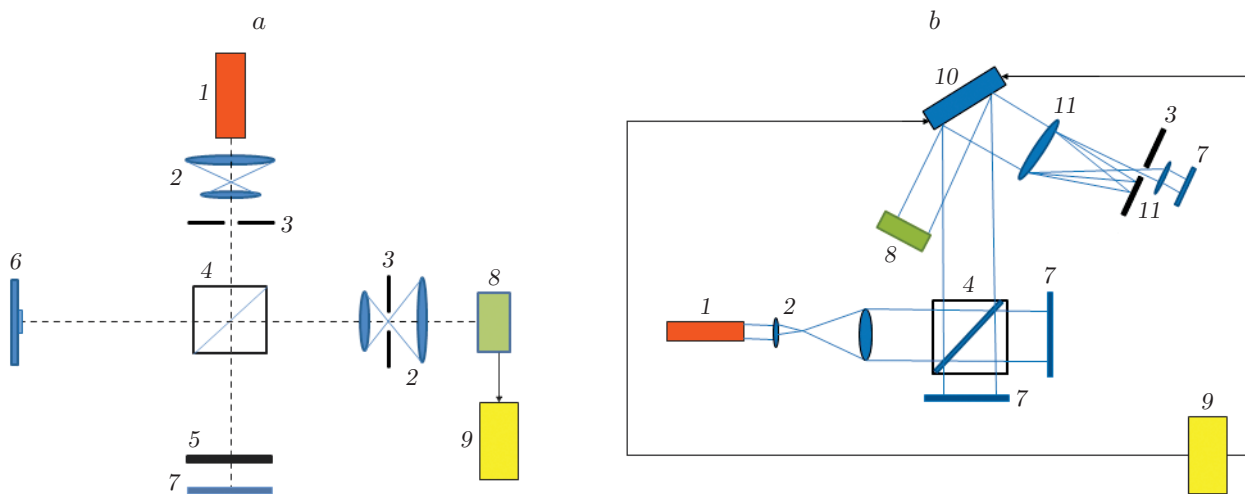


Рис. 5. Эксперимент по коррекции искажений внутри интерферометра: *a* — схема записи опорной и объектной голограмм; *b* — схема для получения цифровой голографической коррекции искажений. Обозначения: 1 — гелий-неоновый лазер, 2 — коллиматор, 3 — диафрагма, 4 — светоделитель, 5 — аббератор (пластиковая пластинка), 6 — зеркало с наноступенькой, 7 — зеркала, 8 — записывающее устройство (ПЗС- или КМОП-камера), 9 — ПК, 10 — матричный модулятор, 11 — линзы

горячих переходов от колебательных возбуждённых состояний ($\nu = 1$ и $\nu = 2$) в основное электронное состояние.

На рис. 4, *b* изображена спектроголограмма спектра поглощения паров рубидия для дублета $5^2S_{1/2} - 5^2P_{3/2}$ (780 нм) и $5^2S_{1/2} - 5^2P_{1/2}$ (795 нм). Спектральная ширина данной голограммы уже составляла 15 нм, а изгиб интерференционных полос был заметнее ввиду высокой вероятности данных переходов. Такие изгибы интерференционных полос вблизи линий поглощения носят название крюков Рождественского, по которым, например, можно определить силу осциллятора соответствующего перехода, пропорциональную квадрату расстояния от вершины крюка до линии поглощения [4].

Перезапись голограмм также осуществлялась вышеописанным методом. Пропускающий модулятор из-за его низкого разрешения и крупных размеров пикселей был заменён отражающим пространственным модулятором света LETO Hologeye с разрешением

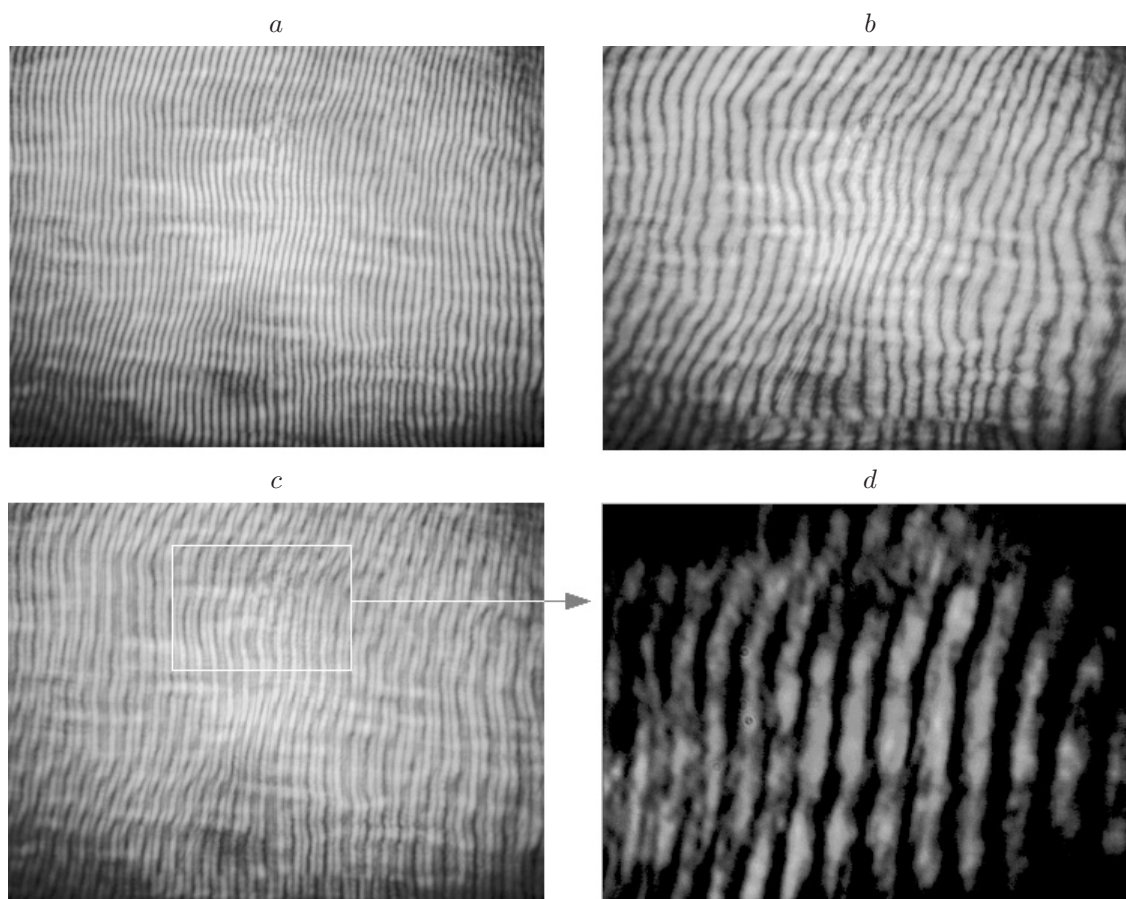


Рис. 6. Голограммы, полученные при исследовании системы с коррекцией искажений: *a* — голограмма с абберациями системы (опорная), *b* — голограмма с абберациями (объектная), *c* — полусумма опорной и объектной голограмм, *d* — интерферограмма (голограмма) после коррекции

1920 × 1080 (размер пикселя 6 мкм). Это потребовало изменения схемы для перезаписи голограмм (рис. 5, *a*). Результаты усиления представлены в работах [12, 13] и требуют дальнейшего улучшения качества постановки эксперимента вследствие сильных шумов. Поэтому возникла необходимость в ликвидации искажений, вносимых интерферометром в результирующую голограмму, поскольку они влияют на восприятие полученных голограмм и мешают их обработке.

Коррекция искажений, вносимых элементами цифрового интерферометра.

Любая оптическая система содержит некоторое отклонение пути пучка, называемое абберациями оптической системы. Они проявляются в результирующей интерференционной картине как искажение полос. Эффекты этих аббераций вызвали, в частности, проблемы при повышении чувствительности интерферометра с использованием технологии повторной записи. Так, при увеличении чувствительности интерференционной картины в N раз происходили новые абберации, вызванные установкой повторной записи.

Они добавлялись к абберациям, уже представленным на интерферограмме. Тем самым в N раз увеличивались и абберации. В работе [4] были достигнуты усиления в 256 и 512 раз, что при таком же усилении аббераций сделало работу с голограммами невозможной.

Представляется реальным устранение аббераций голографическими интерференционными методами. Одним из методов компенсации искажений является так называемый

метод комбинированной интерферограммы [14]. В этом методе опорная (рис. 6, *a*) и объектная (рис. 6, *b*) интерферограммы объединяются (рис. 6, *c*) и освещаются параллельным пучком света. В результате дифракции на эталонной интерферограмме будет реконструирована серия волн, из которой можно извлечь n -й порядок дифракции для прохождения второй предметной интерферограммы.

Данный метод был использован для компенсации aberrаций на основе схемы, изображённой на рис. 5, *b*. При этом производилось комбинирование двух голограмм. Сначала записывалась опорная голограмма при отсутствии объектов, содержащая только искажения системы (см. рис. 5, *a*). Распределение интенсивности интерференционной картины на опорной интерферограмме (см. рис. 6, *a*) имеет вид

$$I_1(r) \sim 1 + \cos(nk_0r + n\varphi),$$

где $I_1(r)$ — распределение интенсивности на эталонной интерферограмме; k_0 — проекция волнового вектора на плоскость интерферограммы; r — радиус-вектор текущей точки; φ — фазовый сдвиг, вызванный искажениями системы регистрации; n — порядковый номер дифракции. Интенсивность же объектной интерферограммы (см. рис. 6, *b*)

$$I_2(r) \sim 1 + \cos(nk'_0r + n\varphi + n\varepsilon),$$

где $I_2(r)$ — распределение интенсивности на объектной интерферограмме; k'_0 — проекция волнового вектора на плоскость интерферограммы в случае, когда объект исследования установлен в плече интерферометра; ε — сдвиг фазы волны, вызванный объектом исследования (ступенька).

Интерферограммы записывались с использованием интерферометра типа Майкельсона (см. рис. 5, *a*). Источником являлся гелий-неоновый лазер 1 с длиной волны 0,63 мкм и коллиматором 2 в качестве расширителя пучка. С помощью светоделителя 4 пучок делился на два пучка равной интенсивности. Поскольку в эксперименте подтверждался изложенный ранее физический принцип, aberrации системы регистрации были смоделированы пластиковой пластинкой 5, что дало интерференционные искажения, разрешимые невооружённым глазом. Зеркало 6 содержало уже описанную ранее ступеньку, которая использовалась как объект исследования, в то время как зеркало 7 было плоским с небольшим наклоном, чтобы обеспечить интерференционную картину с требуемой частотой. И опорная, и объектная интерферограммы записывались с помощью цифровой камеры 8. Далее с помощью ПК 9 вычислялась полусумма двух изображений, которая подавалась на модулятор 10 в установке, изображённой на рис. 5, *b*. Пространственные частоты эталонной и предметной интерферограмм выбирались таким образом, чтобы n -е порядки дифракции, извлечённые из них, расходились под разными углами. С помощью плоского зеркала 7 и фильтра перед ним (щель 3), которые устанавливались вместо ПЗС-камеры, +1-й порядок дифракции с опорной интерферограммы отражался и возвращался назад по тому же пути, освещая комбинированную интерферограмму, которая подавалась на модулятор. В результате волновой фронт восстановился без вызванных системой регистрации aberrаций и после отражения от ПМС его можно было записать камерой ПЗС или КМОП 8. Тем самым конечная картина интенсивности на такой интерферограмме (см. рис. 6, *d*) имеет вид

$$I_3(r) \sim 1 + \cos[n(k'_0 - k_0)r + n\varepsilon]. \quad (3)$$

Можно видеть, что в (3) отсутствует фаза φ , вносимая aberrациями оптической системы (высокочастотная составляющая). Результирующая картина являлась частью всей голограммы, поскольку в эксперименте для выделения необходимого порядка с помощью

фильтра применялись ограничения по частоте полос подаваемого на модулятор изображения.

Таким образом, показана возможность избавиться цифровыми методами от ненужных искажений, вызванных элементами системы регистрации [12].

Заключение. В настоящее время известны подходы по обработке и записи голограмм с помощью цифровых технологий. Описанный подход для метрологии обеспечивает быстрый и относительно простой метод увеличения чувствительности интерферограмм с возможностью создания полностью автоматических систем. Такая процедура, конечно, ничего не добавляет к информации, содержащейся в интерференционной картине, но во многих случаях, особенно когда деформации полос маленькие, позволяет расшифровать информацию гораздо быстрее и проще. Подобные подходы могут быть использованы для интерферометрии в реальном времени, спектроскопии, при исследовании плоскостности объектов с неровностями порядка $\lambda/100$ и в топографии поверхностей с перепадом высот менее нескольких нанометров.

В данной работе показаны ограничения, обусловленные, в частности, размером пикселя пространственных модуляторов света (32 мкм в Holoeye LC2002, 6 мкм в Holoeye Leto), различными источниками шума, абберациями и искажениями оптических систем, которые сильно сказываются на качестве голограмм с увеличенной чувствительностью. Универсальность оптических схем позволяет исключить влияние шумов и искажений любой цифровой системы записи. Использование цифровой голографии упрощает последнюю задачу и позволяет проводить измерения сил осцилляторов для слабых переходов спектра поглощения (например, в парах йода) при отсутствии искажений, вызванных системой регистрации.

Следует отметить, что процесс коррекции трудоёмок, поэтому одной коррекции должно быть достаточно для увеличения чувствительности в 2 раза, а для всех трёх этапов (запись, усиление, коррекция искажений) можно использовать одну и ту же установку. Представленные результаты не конечны и требуют доработки качества, что станет следующим этапом в обсуждаемых экспериментальных исследованиях.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок)» (проект № 8.6743.2017/8.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Константинов В. Б., Бабенко В. А., Малый А. Ф.** Голографический интерференционный микроскоп для исследования микрообъектов // ЖТФ. 2007. **77**, вып. 12. С. 92–95.
2. **Гужов В. И., Ильиных С. П., Марченко И. О.** Метод повышения пространственного разрешения в цифровой голографической микроскопии // Автометрия. 2018. **54**, № 3. С. 104–110.
3. **Зейликович И. С., Пулькин С. А.** Голографическая интерференционная спектроскопия с увеличением чувствительности // Тез. докл. V Всесоюз. конф. по голографии. Рига, 12–14 ноября 1985. С. 180–181.
4. **Зейликович И. С., Комаровский В. А., Пулькин С. А., Гайда Л. С.** Увеличение чувствительности «крюков» Рождественского апостериорным методом // Оптика и спектроскопия. 1984. **57**, № 2. С. 799–802.
5. **Pulkin S., Borisov E., Balabas M. et al.** Interference comb-spectroscopy with increasing sensitivity // Proc. SPIE. 2017. **10022**. 100220B. DOI: 10.1117/12.2246284.

6. **Venediktov D. V., Shoev V. I., Borisov E. N. et al.** Holographic femtosecond comb spectroscopy in wide spectral range // Proc. of the Intern. Conf. Laser Optics (ICLO 2018). St. Petersburg, Russia, 4–8 June 2018. P. 206. DOI: 10.1109/LO.2018.8435811.
7. **Balbekin N., Petrov N., Pulkin S. et al.** Digital holographic interferometer with correction of distortion // Proc. SPIE. 2018. **10799**. 107990A. DOI: 10.1117/12.2326531.
8. **Balbekin N., Petrov N., Pulkin S. et al.** Phase-only LCOS modulator as a correcting element in digital interferometers // Proc. SPIE. 2018. **10818**. 108180Z. DOI: 10.1117/12.2500491.
9. **Zeilikovich I. S., Lyalikov A. M.** Holographic methods for regulating the sensitivity of interference measurements for transparent media diagnostics // Sov. Phys. Usp. 1991. **34**, Iss. 1. P. 74–85.
10. **Sevrygin A. A., Korotkov V. I., Pulkin S. A. et al.** Digital holographic Michelson interferometer for nanometrology // Proc. SPIE. 2014. **9271**. 927118. DOI: 10.1117/12.2071084.
11. **Желтиков А. М., Федотов А. Б.** Оптика микроструктурированных волокон // Соросовский образовательный журнал. 2005. **9**, № 2. С. 1–12.
12. **Pulkin S. A., Borisov E. N., Balabas M. V. et al.** Experimental nonlinear interference comb spectroscopy // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2017. **81**, N 12. P. 1661–1663. DOI: 10.3103/S1062873817120255.
13. **Balbekin N., Petrov N., Pulkin S. et al.** Digital holographic amplification of interferograms in the Michelson interferometer using the phase-only LCOS modulator // Proc. SPIE. 2017. **10438**. 1043808. DOI: 10.1117/12.2278049.
14. **Sevrygin A. A., Korotkov V. I., Pulkin S. A. et al.** Digital holographic Michelson interferometer for nanometrology // Proc. SPIE. 2014. **9271**. 927118. DOI: 10.1117/12.2071084.

Поступила в редакцию 22.11.2019

После доработки 18.12.2019

Принята к публикации 24.12.2019
