

55. Измерение фазовых искажений волновых фронтов методами компьютерной голографии

М. С. Ковалев, Г. К. Красин, С. Б. Одинокоев, А. Ю. Жерев

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Фазовые искажения возникают из-за атмосферной турбулентности, условий эксперимента или низкого качества системы формирования изображения. Они могут серьезно ограничить разрешение изображения. Компьютерную голографию можно использовать для доступа к комплекснозначному оптическому полю от объекта под когерентным освещением после обнаружения интерференции интенсивности между объектом и опорными пучками. В этой работе мы разработали подходы к улучшению четкости изображения для измерения фазовых искажений в компьютерной голографии с использованием примера дефокусировочного измерения.

Ключевые слова: Управление лазерным лучом, Адаптивная оптика, Голография, Компьютерно-синтезированная голограмма, Измерение волнового фронта.

Цитирование: Ковалев, М. С. Измерение фазовых искажений волновых фронтов методами компьютерной голографии / М. С. Ковалев, Г. К. Красин, С. Б. Одинокоев, А. Ю. Жерев // HOLOEXPO 2018 :

XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 226—232.

Введение

Исследования лазерных волновых полей сегодня популярны, поскольку они могут помочь решить многие исследовательские и прикладные задачи в области современных систем фотоники.

Во-первых, это задачи оптической метрологии, в которых должны быть определены некоторые физические характеристики объекта. Это такие характеристики [1–6], как форма поверхности, показатель преломления, оптическая толщина и т. д. Характеристики необходимы для создания точных оптических систем и устройств [7–9] и могут быть определены с помощью измеренных параметров оптической волны от источника излучения, который прошел через объект или отразился от его поверхности. Во-вторых, есть задачи, которые содержат определение характеристик оптического излучения, образованного некоторыми внешними источниками. Эти задачи предшествовали в лазерной физике, где тесты контроля качества необходимы после генерации лазерных лучей [8] и при построении различных адаптивных систем. Кроме того, при решении определенных технических задач необходимо сформировать волновое поле с требуемыми характеристиками [2, 10–12].

Основной проблемой в исследовании лазерных волновых полей является регистрация их пространственного распределения амплитудно-фазового распределения, поскольку устройства, которые измеряют прямолинейные фазовые искажения, еще не были изобретены. Конечно, в настоящее время существуют некоторые методы, позволяющие зарегистрировать профиль фазового фронта и изучить волновое поле, образованное различными источниками света. Наиболее развитыми устройствами являются интерферометры [6] и датчики, основанные на методах Гартмана [13, 14] и Шака — Гартмана. Самые ценные результаты в исследовании лазерных волновых полей были получены с помощью различных интерферометров. Однако

они могут определять только разность фаз двух когерентных световых пучков. Один из них — эталонный луч, что существенно ограничивает область их применения. Другие фазометрические методы намного хуже по точности с интерферометрическими, а также не дают удовлетворительного решения задачи записи оптического волнового поля. В результате все еще популярна задача изобретения альтернативных методов измерения фазовых искажений светового поля.

Предлагается использовать принципы компьютерной голографии для измерения фазовых искажений [15–21]. Компьютерный синтез голограмм основан на математическом представлении фундаментальных принципов оптической голографии [22]. Синтез начал развиваться одновременно с вычислительной техникой и такими программными инструментами, как быстрая трансформация Фурье.

В настоящее время персональный компьютер и вычислительный инструмент, установленные на нем, позволяют вычислить компьютерные голограммы (КГ) для конкретной задачи. Широко распространено мнение, что преимущество метода компьютерного синтеза заключается в том, что он устраняет необходимость фотохимической записи голограмм. Кроме того, метод позволяет восстановить его численно в реальном времени; улучшить качество восстановленного изображения с помощью многих методов цифровой обработки изображений; и использовать эти динамически изменяющиеся КГ в оптических датчиках и коррекционных системах оптических средств. Возможность использования функции распределения фаз, выражаемой полиномиальным представлением Цернике [23, 24] как виртуальным объектом, позволяет определить интерференционное взаимодействие волновых фронтов аберрации и плоских волн любой сложности. При работе с КГ, записанными на светочувствительном материале, некоторые ограничения появляются из-за небольшого динамического диапазона. Для увеличения диапазона

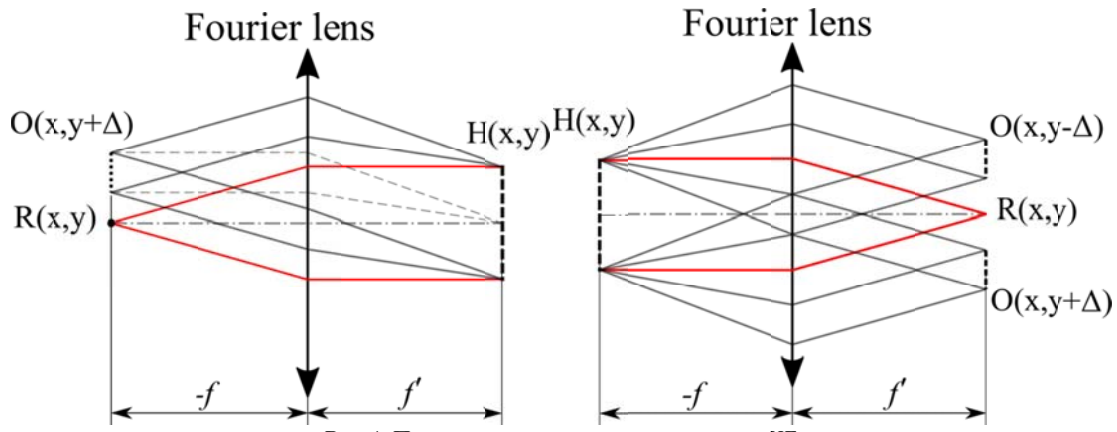


Рис. 1. Принципы синтеза и реконструкции КГ

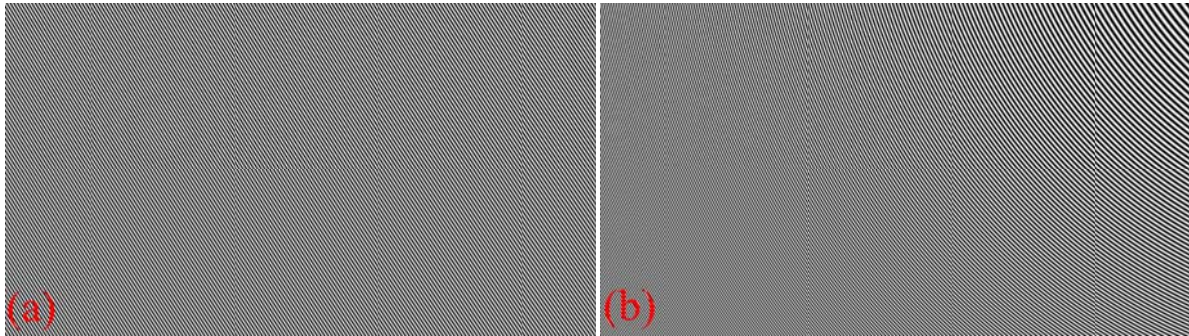


Рис. 2. Амплитуда амплитуды КГ для aberrации дефокусировки с aberrационным значением 1λ (a) и значением aberrации 15λ (b)

различных aberrаций требуется введение такой динамически меняющейся прозрачности, например, пространственного модулятора света на ЖК-дисплее. В этом случае датчик волнового фронта неизбежно будет подключен к массивному электронному блоку управления; но достигнутая ценность стоит того. Определение aberrаций предназначено для выполнения в соответствии с широко известным принципом «грубо-точной» шкалы, в котором предварительный быстрый анализ определяет тип aberrации, а затем их размер анализируется с точным регулированием.

1. Принципы расчета КГ

КГ — распределение интенсивности от двух волн — эталон $R(x, y)$ и объект $O(x, y)$ волн. Синтез и реконструкция КГ показаны на рис. 1. В этом случае эталонная волна представляет собой aberrированный волновой фронт, объектная волна — поле из точки индикатора. Таким образом, если значение aberrации в падающей волне и КГ сопоставимо, мы получим небольшую индикаторную точку.

Амплитуда функции определяется прозрачностью комбинацией опорного и объектного волн

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |O(x, y) + R(x, y)|^2 = \\ &= |R(x, y)|^2 + |O(x, y)|^2 + \\ &+ O(x, y)R^*(x, y) + O^*(x, y)R(x, y), \end{aligned} \quad (1)$$

где $O(x, y)$ — объектная волна, $R(x, y)$ — опорная волна, знак * означает комплексно сопряженный.

$$O(x, y) = |O(x, y)| \exp[i\phi_0(x, y)] \quad (2)$$

Уравнение (2) показывает сложную амплитуду объектной волны с реальной амплитудой $|O(x, y)|$ и фазе $\phi_0(x, y)$.

$$R(x, y) = |R(x, y)| \exp[i\phi_0(x, y)] \quad (3)$$

Уравнение (3) аналогично показывает комплексную амплитуду опорной волны.

Исходный объект волна может быть восстановлена, когда КГ освещается опорной волной. Для восстановления изображения следует умножить записанное КГ, которое интенсивность помех $I(x, y)$ и поле опорной волны $R(x, y)$.

$$\begin{aligned} I(x, y)R(x, y) &= \\ &= |R(x, y)|^2 R(x, y) + |O(x, y)|^2 R(x, y) + \\ &+ O(x, y)R(x, y)|^2 + R^2(x, y)O^*(x, y). \end{aligned} \quad (4)$$

Первый член в правой части уравнения (4) пропорционален значению $R(x, y)$ опорной волны. Пространственно меняющееся «облако» вокруг первого порядка дифракции описывается вторым членом. Они образуют нулевой порядок дифракции или компонент фона вместе. Третий член, до известного множителя, является точной копией исходного поля $O(x, y)$ и называется виртуальным изображением объекта. Четвертый термин — это другое изображение объекта, которое является реальным изображением.

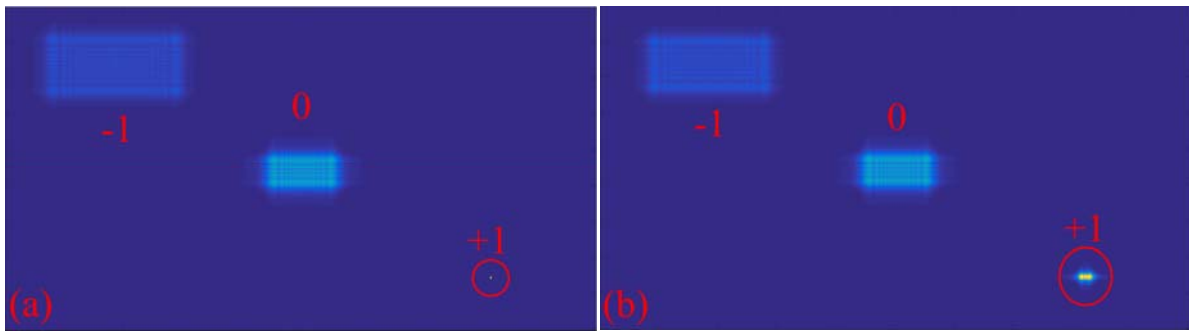


Рис. 3. Реконструированные изображения для 6λ дефокусированной волны и децентрализованной аберрации серого цвета КГ значения 6λ (a) и 5λ (b)

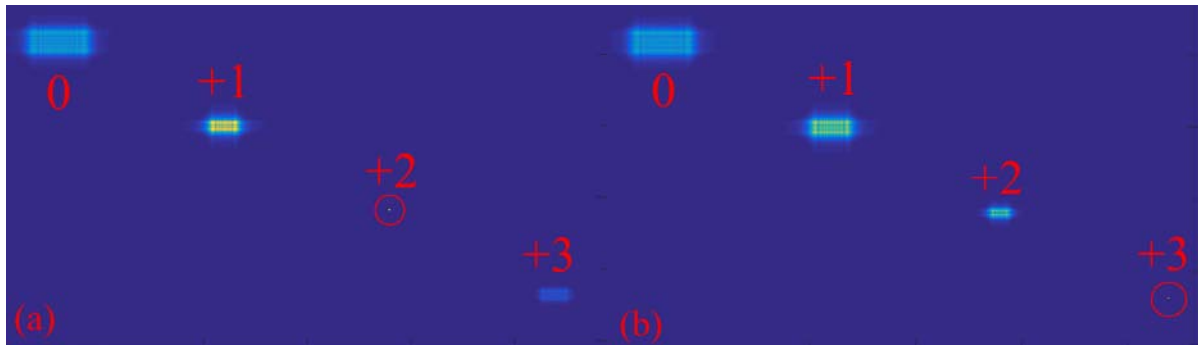


Рис. 4. Реконструированные изображения для дефокусированной аберрации с дефокусировкой волны и фазовой шкалы с сечением 6λ КГ для значений 3λ (a) и 2λ (b)

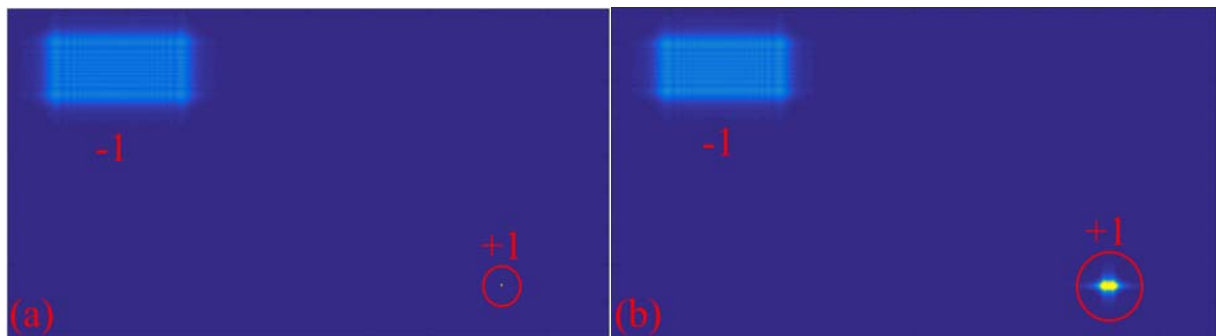


Рис. 5. Реконструированные изображения для 6λ расфокусированной волны и двоичной дефокусировочной аберрации КГ значения 6λ (a) и 5λ (b)

2. Компьютерное моделирование

Была написана программа Matlab для моделирования. В этой программе из приведенных выше формул была рассчитана амплитудная КГ. Объектная волна — это индикаторная точка в массиве нулей. Эталонная волна представляет собой плоскую волну с полиномом Цернике как фазовый множитель внутри. На рис. 2 можно увидеть амплитуду КГ для аберрации дефокусировки. КГ — это дифракционная решетка, на которой применяется многочлен Цернике. Несущая частота дифракционной решетки определяется положением точки индикатора. Чем ближе индикатор к центру, тем ниже несущая частота дифракционной решетки. Но из-за отрицательного эффекта нулевого порядка нельзя поставить точку индикатора слишком близко к центру.

Далее в программе рассчитывается реконструкция такой КГ. Сначала реконструкция КГ была проведена с помощью опорной волны с тем же значением,

как аберраций в КГ. На рис. 3 можно увидеть результат восстановления амплитуды КГ. В порядке восстановления восстановленного изображения $+1$ видна точка дифракционного размера (рис. 3a). Это означает, что значения аберрации в КГ и в падающей волне совпадают. Затем КГ был изменен для определения минимального обнаруживаемого значения фазового искажения. В этом случае точка индикатора была размыта (рис. 3b). Минимальное детектируемое значение фазового искажения составляло $\lambda/35$. Это значение является постоянным для всего динамического диапазона, который был проверен путем моделирования от $0,01\lambda$ до 10λ .

Реконструируя амплитудные КГ, можно получить три порядка дифракции. Нулевой порядок, который не содержит никакой полезной информации и ± 1 дифракционных заказов (рис. 3). Реконструируя фазовые КГ,

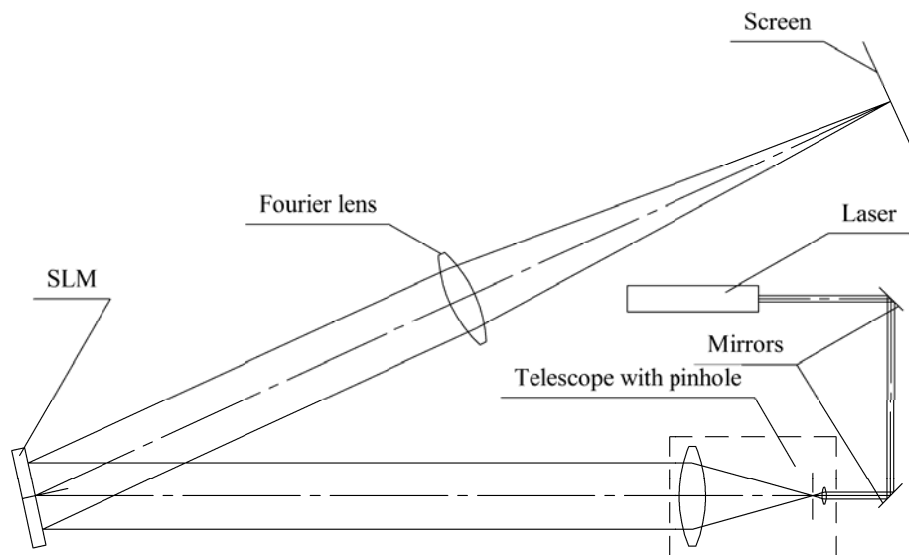


Рис. 6. Оптическая схема экспериментальной установки

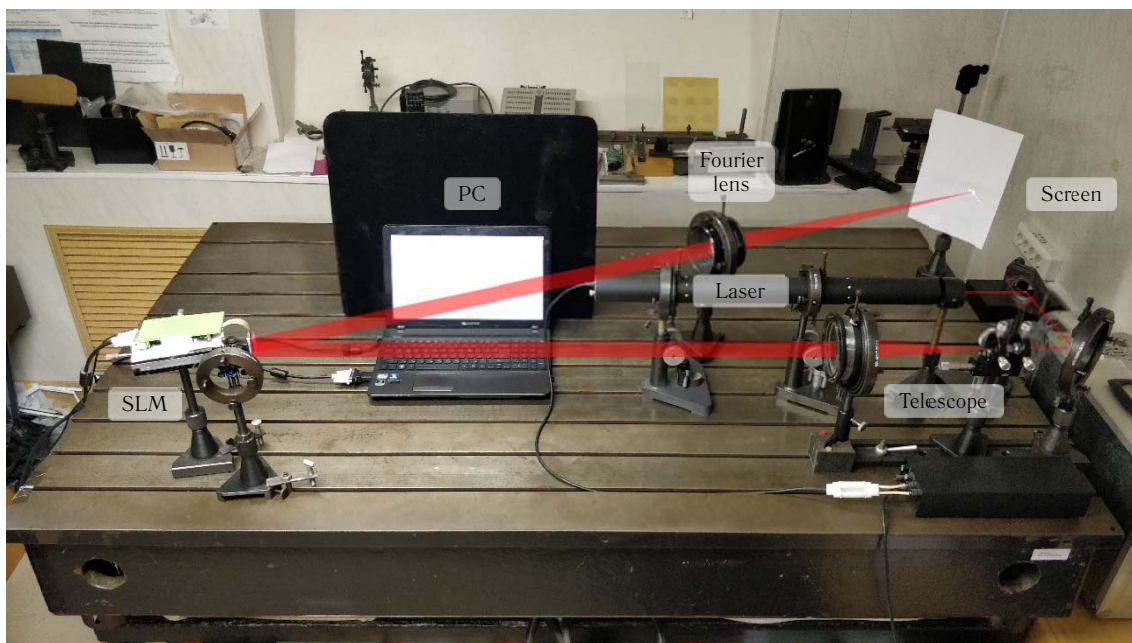


Рис. 7. Фото экспериментальной установки

можно получить более дифракционные порядки. В случае фазовых КГ было обнаружено новое явление, которое может быть применено к измерению aberrации. Точка индикатора перемещается до +2 порядка (рис. 4а), когда фаза КГ освещается опорной волной с величиной aberrаций в два раза больше, чем в ГК. Точка индикатора переходит к +3, порядка (рис. 4б), когда величина aberrации в опорных волнах в три раза больше. Кроме того, эффективность дифракции падает, и становится невозможным распознать изображение точки индикатора. С помощью этого явления можно ускорить алгоритм измерения aberrаций.

Из рис. 2 видно, что КГ имеют оттенки серого. Мы также заключили моделирование с помощью бинарных КГ. Результат показан на рис. 5. В этом случае минимальное обнаружимое значение фазового искажения остается неизменным, хотя коэффициент дифракции увеличился. Также исчез нулевой порядок дифракции,

а также все четные порядки. Это означает, что вся энергия распределяется по неравномерным порядкам дифракции. Не удалось повторить эксперимент с перемещением указательной точки в дифракционных порядках с бинарными КГ. Однако бинарные КГ могут упростить физические эксперименты. Необходимо знать фазовую характеристику пространственного модулятора света при использовании градаций серого КГ. Хотя для двоичных КГ нет такой проблемы. Таким образом, бинарные КГ, в дополнение к усиленной дифракционной эффективности, являются предпочтительными для использования в дальнейших физических экспериментах.

КГ были рассчитаны для четырех различных типов aberrаций: дефокусировки, комы, астигматизма и сферической aberrации. И указанное выше явление

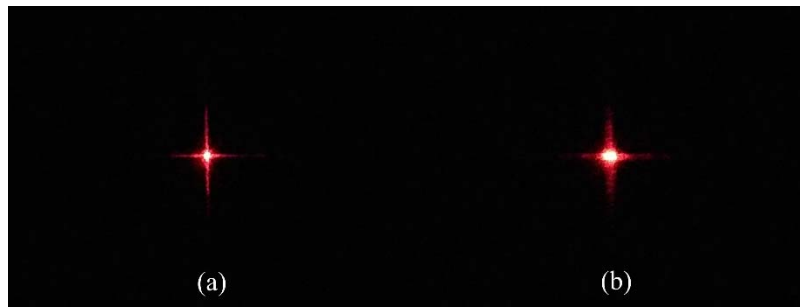


Рис. 8. Точка фокусировки для плоской волны (а) и для волны с отклоняющейся аберрацией 5λ (b) с отсутствием КГ на SLM

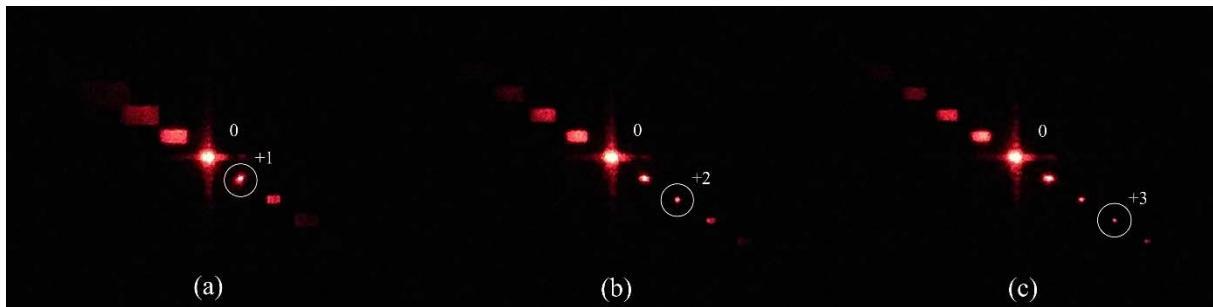


Рис. 9. Реконструированные изображения для дефокусирующей аберрации с расфокусированным волновым и серо-серого цвета для 6λ ГК значений 6λ (а), 3λ (b) и 2λ (с)

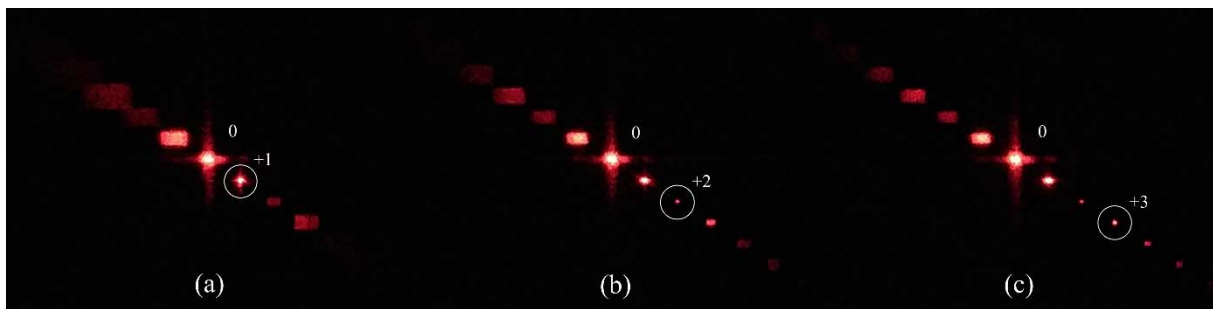


Рис. 10. Реконструированные изображения для 6λ расфокусированной волны и двоичной дефокусирующей аберрации ГК значений 6λ (а), 3λ (b) и 2λ (с)

было получено для всех из них. Но для абсорбции дефокусировки были выполнены дальнейшие эксперименты из-за простоты введения в оптическую схему.

3. Экспериментальные исследования

Для изучения предложенного метода была разработана экспериментальная оптическая установка. Оптическая схема этой стойки показана на рис. 6. Экспериментальная установка состоит из лазера, телескопической расширяющей системы с отверстием, дисплеем, Фурье-объективом и экраном.

Лазерный свет, отраженный двумя зеркалами, падает на телескопическую систему. Телескоп расширяет диаметр световой волны до размера SLM. Пинхол используется для очистки волны и формирования плоского волнового фронта с аберрациями менее $0,01\lambda$. Следующая волна падает на SLM, где отображаются КГ. В конце экран помещается в фокальную плоскость линзы Фурье. Реконструированное изображение расположено на экране.

Экспериментальная установка показана на рис. 7. Мы используем He–Ne-лазер с длиной волны 633 нм.

Телескопическая система состоит из объектива с микроскопом $20\times$, просвета 20 мкм и объектива с фокусным расстоянием 250 мм. SLM PLUTO VIS (420–650 нм) использовался для отображения КГ. Объектив Фурье имеет фокусное расстояние 1 000 мм.

Во время экспериментальных исследований расчетные КГ отображались на SLM, а восстановленные изображения были захвачены камерой. Мы изучаем три градиционных шкалы КГ (рис 9) и три бинарных КГ (рис. 10). Перед экспериментами фиксировалось изображение точки фокусировки плоской волны и аберрированной точки фокусировки волны (рис. 8). В то время как мы исследовали фокусирующую точку, в SLM отображалось сплошное белое поле.

На рис. 8 видно, что плоская волна без аберраций имеет узкую фокусирующую точку с поперечным сечением, обусловленную дифракцией на апертуре SLM (рис. 8a). Дифракционные порядки, вызванные дифракцией в структуре SLM, выходят за пределы поля изображения. Затем мы добавляем дефокусирующую аберрацию в волне, перемещая объектив микроскопа с отверстием от второй линзы вдоль оптической оси.

Добавление дефокусировки приводит к размытию точки фокусировки и креста (рис. 8b).

Значение опорной волны расфокусировка 6λ. Дальнейшие эксперименты проводили с этой расфокусировкой опорной волной и КГ отображается на SLM. Изображения, восстановленные из полутонных шкал КГ для дефокусировки 6λ, 3λ, 2λ дефокусировочной волной, показаны на рис. 9. Реконструированное изображение для дефокусирующей КГ 6λ имеет индикаторную точку в порядке +1, как и ожидалось (рис. 9a). Точка индикатора имеет форму узкой точки с наименьшим диаметром. Все остальные заказы имеют прямоугольную форму большего размера. Реконструированные изображения для 3λ и 2λ дефокусирующих градаций серого КГ имеют контрольные точки в точках +2 и +3 порядка (рис. 9b и 9c).

Изображения, восстановленные из бинарных ГК для дефокусировки 6λ, 3λ, 2λ дефокусировочной волной, показаны на рис. 10. Реконструированное изображение для 6λ дефокусировки ГК имеет индикаторную точку в порядке +1 (рис. 10a). Для двоичных ГК восстановленные изображения имеют большее количество видимых порядков из-за более низкого энергетического уровня точки нулевого порядка.

Восстановленное изображение для 3λ дефокусирующих двоичных ГК имеет индикаторную точку в порядке +2 (рис. 10b), но эта точка имеет низкий уровень,

так как это четный порядок. Восстановленное изображение для 2λ дефокусирующих двоичных ГК должно иметь индикаторную точку в +3-ом порядке (рис. 10c), но точка порядка +2 все еще имеет меньший диаметр после меньшего энергетического уровня.

Заключение

Предложен новый метод измерения аберрации плоской волны. Метод основан на теоретически описываемом и рассчитанном явлении смещения индикаторной точки на более высокие порядки дифракции, а волновая аберрация контролируется с установкой КГ на значение делителя. Это явление рассчитано для градаций серого и бинарной КГ. Двоичная КГ демонстрирует более высокую эффективность дифракции, но даже точки порядка дифракции в восстановленном изображении имеют более низкий уровень энергии по сравнению с точками нечетного порядка. Это затрудняет автоматическое измерение по сравнению с КГ в оттенках серого. В градациях серого КГ показано расчетное поведение, и измерение аберрации волны может быть обработано в более высоких порядках дифракции восстановленного изображения для увеличения разрешения аберрации.

Благодарность

Эта работа была выполнена в МГТУ им. Баумана при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения № 14.577.21.0258 (грант № RFMEFI57715X0258).

Список источников

- [1] **Poleshchuk, A. G.** Interferometric testing of steep cylindrical surfaces with on-axis / A. G. Poleshchuk, R. K. Nasyrov, J. M. Asfour // *Computer Optics*. — 2016. — Vol. 40. — № 5. — P. 625–628.
- [2] **Rozhkov, O. V.** Bauman MSTU scientific school “zoom lens design”: Features of theory and practice. / O. V. Rozhkov, D. E. Piskunov, P. A. Nosov, V. Y. Pavlov, A. M. Khorokhorov, A. F. Shirankov // *Computer Optics*. — 2018. — Vol. 42. — № 1. — P. 72–83.
- [3] **Machikhin, A.** Aberration analysis of AOTF-based spectral imaging systems / A. Machikhin, V. Batshev, V. Pozhar // *J. Opt. Soc. Am. A*. — 2017. — Vol. 34. — P. 1109–13.
- [4] **Denisov, D. G.** Error analysis in digital processing of the results of interferometric control of nano-scale local deviations of optical surfaces / D. G. Denisov // *Computer Optics*. — 2017. — Vol. 41. — № 6. — P. 820–30.
- [5] **Gladysheva, Y. V.** Algorithm for reconstructing a profile of a flat high-precision optical surface / Y. V. Gladysheva, I. V. Zhivotovskii, D. G. Denisov, N. V. Baryshnikov // *Measuring technique*. — 2016. — Vol. 2. — P. 28–32.
- [6] **Poleshchuk, A.** Laser interferometers for control of optical surface shape / A. Poleshchuk, V. Khomutov, A. Matochkin, R. Nasyrov, V. Cherkashin // *Photonics*. — 2016. — Vol. 4. — P. 38–51.
- [7] **Fernandez, T. T.** Thermo-optical and lasing characteristics of Cr_x-doped CdSe single crystal as tunable coherent source in the mid-infrared / T. T. Fernandez et al. — *Opt. Mater. Express*. — 2017. — Vol. 7. — P. 3815–25.
- [8] **Katyba, G. M.** Technological aspects of manufacturing terahertz photonic crystal waveguides based on sapphire shaped crystals / G. M. Katyba, K. I. Zaytsev, S. N. Rossolenko, I. A. Shikunova, S. L. Shikunov, D. O. Stryukov, S. O. Yurchenko, V. N. Kurlov // *Proc. SPIE Optical Methods for Inspection, Characterization, and Imaging of Biomaterials III (Munich)*. — 2017. — Vol. 10333. — P. 103331C.
- [9] **Shikunova, I. A.** Neurosurgical sapphire handheld probe for intraoperative optical diagnostics, laser coagulation and aspiration of malignant brain tissue / I. A. Shikunova, K. I. Zaytsev, D. O. Stryukov, E. N. Dubyanskaya, V. N. Kurlov // *Proc. SPIE, Clinical and Preclinical Optical Diagnostics (Munich)*. — 2017. — Vol. 10411. — P. 104110Q.
- [10] **Nosov, P. A.** Aberrational synthesis of optical systems intended for the conversion of laser beams / P. A. Nosov, V. Y. Pavlov, I. I. Pakhomov, A. F. Shirankov. — Saint Petersburg: *Journal of Optical Technology*. — Vol. 78. — № 9. — P. 34–44.
- [11] **Pakhomov, I. I.** Description, calculation, and analysis of the distortions of multimode laser beams / I. I. Pakhomov, A. F. Shirankov, P. A. Nosov // *Saint Petersburg: Journal of Optical Technology*. — 2010. — Vol. 77. — № 2. — P. 3743.
- [12] **Anikanov, A. G.** Structural synthesis of laser optical systems when their parameters are restricted / A. G. Anikanov, I. I. Pakhomov, A. F. Shirankov // *Saint Petersburg: Journal of Optical Technology*. — Vol. 77. — № 2. — P. 3036.
- [13] **Poleshchuk, A. G.** Hartmann wavefront sensor based on multielement amplitude masks with apodized apertures / A. G. Poleshchuk, A. G. Sedukhin, V. I. Trunov, V. G. Maksimov // *Computer Optics*. — 2014. — Vol. 38. — № 4. — P. 695–703.

- [14] **Druzhin, V. V.** Hartmann method for monitoring the shape of convex aspheric mirrors of large optical telescopes / V. V. Druzhin, D. T. Puryaev // J. Opt. Technol. — 2007. — Vol. 74. — P. 794–6.
- [15] **Kovalev, M. S.** / M. S. Kovalev, G. K. Krasin, P. I. Malinina, S. B. Odínokov, H. R. Sagatelyan // J. Phys.: Conf. Ser. — 2016. — Vol. 737. — P. 012064.
- [16] **Bobrinev, V. I.** / V. I. Bobrinev, M. L. Galkin, M. S. Kovalev, P. I. Malinina, S. B. Odínokov // Avtometriya. — 2018. — Vol. 54. — № 1. — P. 31–37.
- [17] **Kovalev, M. S.** The Calculation of the Diffraction Integral Using Chebyshev Polynomials / M. S. Kovalev, G. K. Krasin, P. A. Nosov, S. B. Odínokov, I. Y. Filippov // Engineering Research. — 2017. — Vol. 12. — № 23. — P. 13303–09.
- [18] **Gorelaya, A.** Advanced holographic wavefront sensors / A. Gorelaya, M. Kovalev, P. Malinina, S. Odínokov, M. Soloviev, A. Sevryugin, V. Venediktov // SPIE Conf. Proc. (Prague). — 2017. — Vol. 10233. — P. 102330Z.
- [19] **Kodatskiy, B.** Recent progress in holographic wavefront sensing / B. Kodatskiy, M. S. Kovalev, P. I. Malinina, S. B. Odínokov, M. Soloviev, V. Y. Venediktov // SPIE Conf. Proc. (Beijing). — Vol. 10022. — P. 1002219.
- [20] **Kodatskiy, B.** Holography in Holographic Wavefront Sensors / B. Kodatskiy, M. S. Kovalev, P. I. Malinina, S. B. Odínokov, M. Soloviev, V. Y. Venediktov // SPIE Conf. Proc. — Edinburgh, 2016. — Vol. 10002. — P. 100020K.
- [21] **Orlov, V. V.** Holographic mode wavefront sensor with an enlarged number of measured modes / V. V. Orlov // Quantum Electronics. — 2017. — Vol. 47. — № 8. — P. 773–6.
- [22] **Goodman, J. W.** Introduction to Fourier optics / J. W. Goodman. — Englewood Colorado: Roberts and Co.
- [23] **Hopkins, H. H.** Wave theory of aberrations / H. H. Hopkins. — New York: Oxford Univ. Press, 1949.
- [24] **Born, M.** Principles of optics / M. Born, E. Wolf. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2003. — P. 203–218.

Measuring defocusing using computer holography

M. S. Kovalev, G. K. Krasin, S. B. Odínokov, A. Y. Zherdev
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The phase distortions arise due to the atmospheric turbulence, the experimental conditions or a low quality of the imaging system. They can seriously limit the resolution of the image. Phase distortions can be spatially dependent, which means that a linear space-invariant transfer function cannot completely correct all phase errors in the field of view. Computer holography can be used to access a complex-valued optical field from an object under coherent illumination after detecting interference of intensity between the object and the reference beams. In this work, we developed approaches to improve image sharpness to measure phase distortions in computer holography using the example of defocusing measurement. Image enhancement algorithms use a nonlinear optimization procedure to determine and measure phase distortions to form a reconstructed image at a high resolution. Our work was focused on numerical modelling, developing algorithms and conducting laboratory experiment.

Keywords: Laser beam control, Adaptive optics, Holography, Computer-synthesized hologram, Wavefront measurement.