

Особенности частично-когерентной голографии динамических объектов

С.Г.Аверьянов*, А.И.Ларкин**

Предложен метод регистрации частично-когерентных голографических интерферограмм, позволяющий аппаратно регулировать чувствительность к смещению точек объекта. При этом снижение чувствительности сопровождается уплощением восстановленного изображения, что упрощает автоматический ввод полученной интерферограммы в ЭВМ для дальнейшей обработки. Расчеты показали, что интерферометрической чувствительностью обладают частично-когерентные голограммы с поперечным масштабным преобразованием в одном из плеч регистрирующего интерферометра при коэффициенте преобразования, отличном от -1 , тогда как частично-когерентные голограммы с поворотом в одном из плеч регистрирующего интерферометра подобной чувствительностью к смещению точек объекта во время регистрации не обладают. Последнее позволяет регистрировать объекты при их смещении, значительно превышающем длину волны регистрирующего излучения.

Ключевые слова: частично-когерентные голограммы, интерферометр, динамические объекты.

Введение

Голограммы, зарегистрированные в частично-когерентном свете, обладают рядом уникальных свойств, которых лишены изображения, полученные как при фотографической, так и при когерентной голографической регистрации [1–6]. Особый интерес представляет вырожденный случай, описанный подробно в [1, 3, 6], – случай частично-когерентных голограмм (ЧКГ) с эффектом плоской фокусировки (ЧКГ-ЭПФ). В настоящей работе рассматривается более общий случай ЧКГ, вырожденным случаем которого и является ЧКГ-ЭПФ. В работах [1, 6] ЧКГ Фурье разделены на два класса: ЧКГ с поперечным масштабным преобразованием одного из волновых фронтов (ЧКГФ1) и ЧКГ с поворотом одного из фронтов (ЧКГФ2). Последние обладают интересным свойством – плоской фокусировкой [1, 6].

В [1, 3, 6] подробно рассмотрены случаи поворота на 180° , когда происходит увеличение изображения в 2 раза и наиболее эффективно используется поляризованный свет. Интересной особенностью этого случая является то, что он совпадает по классификации с ЧКГФ1 с коэффициентом масштабного преобразования второго пучка, равным -1 .

При этом наличие оси симметрии проявляет еще одно интересное свойство ЧКГ-ЭПФ – особый характер чувствительности такой схемы регистрации к смещению объекта во время записи голограммы [3]. Это выражается в том, что при восстановлении голограммы двигавшегося во время записи объекта изображение не исчезает, как это случается в классической голографии. Результатом движения объекта во время записи является только лишь снижение разрешения в восстановленном изображении.

Отметим, что при других коэффициентах масштабного преобразования схемы ЧКГФ1 отсутствует центральная симметрия, следствием которой является особый характер чувствительности ЧКГ-ЭПФ к смещению объекта во время регистрации.

В настоящей работе рассматриваются схемы ЧКГФ1 с коэффициентом масштабного преобразования, отличным от -1 , и ЧКГФ2 при угле разворота волновых фронтов, не равном 180° . Ранее не было известно, что происходит в невырожденном случае, т.е. при коэффициенте масштабного преобразования, отличном от -1 .

В частности, не анализировалось, возникает ли в этом случае голографическая чувствительность метода записи к смещениям в объекте регистрации и возможна ли вообще запись частично-когерентных интерферограмм (ЧКИ). Этой проблеме посвящена первая половина работы. Во второй половине также показано, что случай ЧКГФ2 позволяет регистрировать объекты, смещение которых во время записи значительно превышает длину волны регистрирующего излучения. Это дает возможность за счет увеличения времени регистрации избежать проблем взаимозаместимости реальных чувствительных сред при регистрации быстропротекающих процессов.

1. Влияние смещения объекта регистрации во время экспозиции на регистрацию ЧКГФ1

В качестве схемы регистрации для ЧКГФ1 выберем описанную в [1] схему интерферометра Маха – Цендера с поворотом волнового фронта на 180° и введенными в плечи масштабирующими коллиматорами, каждый из которых состоит из двух конфокальных объективов с фокусными расстояниями F_1, F_2 и F_2, F_1 . Такая схема дает возможность при компенсации разности оптических путей обеспечить увеличение одного из изображений объекта относительно второго. Это позволяет рассматривать «чистую» ЧКГФ1, а не смесь ЧКГФ1 и ЧКГ Френеля [1].

Для выяснения того, что происходит при регистрации ЧКГФ1, вычислим разность фаз, возникающую при прохождении луча от объекта до плоскости регистрации че-

*РНЦ «Курчатовский институт», Россия, 123182 Москва, пл. Курчатова, 1

**Московский государственный инженерно-физический институт (технический университет), Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

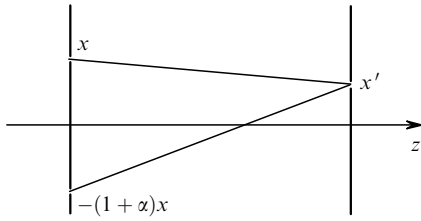


Рис.1. Схема ЧКГФИ:

x – точка на объекте, видимая из точки x' в плоскости регистрации при прохождении света через первое плечо схемы регистрации; $-(1 + \alpha)x$ – точка на объекте, видимая из точки x' в плоскости регистрации при прохождении света через второе плечо схемы регистрации.

рез разные плечи интерферометра. Запишем коэффициент увеличения второго плеча интерферометра относительно первого в виде $-(1 - \alpha)$. Тогда разность путей от точки x в плоскости объекта до точки x' в плоскости регистрации (рис.1) при прохождении света через разные плечи интерферометра можно записать в виде

$$\Delta x = \{ [x' + (1 + \alpha)x]^2 + F^2 \}^{1/2} - [(x' - x)^2 + F^2]^{1/2}, \quad (1)$$

где F – радиус кривизны регистрирующего волнового фронта на оси схемы регистрации. Разложим это выражение в ряд Тейлора и оставим только члены второго порядка. Введя зависимость координаты точки объекта от времени t , получим, что

$$\Delta x(t) \approx \frac{2 + \alpha}{2F} [\alpha x^2(t) + 2x(t)x']. \quad (2)$$

Вычислим разность фаз в точке x , обусловленную изменением положения точки за время Δt :

$$\delta(\Delta t) \approx \frac{1 + \frac{1}{2}\alpha}{2\pi\lambda F} [2\alpha x(t_0)\xi(\Delta t) + \alpha\xi^2(\Delta t) + 2x'\xi(\Delta t)], \quad (3)$$

где

$$\xi(\Delta t) = x(t_0 + \Delta t) - x(t_0)$$

– смещение точки в плоскости объекта.

Второе слагаемое в выражении (3) может быть сравнимо с первым только в малой области в окрестности оси схемы в объектной плоскости. Кроме того, смещение должно быть меньше минимально разрешаемого элемента объекта регистрации. Это обусловлено снижением разрешающей способности схемы, связанным с третьим слагаемым (данная ситуация аналогична случаю ЧКГ-ЭПФ [3]). Следовательно, даже при нахождении регистрируемого объекта на оси схемы регистрации второе слагаемое будет оказывать влияние на регистрацию в области, размер которой неразрешается схемой регистрации. Таким образом, вторым слагаемым можно пренебречь. В итоге получим

$$\delta(\Delta t) \approx \frac{1 + \frac{1}{2}\alpha}{2\pi\lambda F} [2\alpha x(t_0)\xi(\Delta t) + 2x'\xi(\Delta t)]. \quad (4)$$

Первое слагаемое в выражении (4) не зависит от координаты в плоскости регистрации голограммы и дает вклад в сдвиг фазы, зависящий только от смещения точки объекта и ее координаты в объектной плоскости. Оно отвечает за интерферометрическое поведение изображения при восстановлении голограммы. Второе слагаемое не зависит от координаты в плоскости объекта, но линейно зависит от координаты в плоскости записи голограммы и от смещения точки в объектной плоскости. Оно отвеча-

ет за снижение разрешения при движении объекта во время записи голограммы.

В результате при регистрации ЧКГФИ имеют место два процесса: один, характерный для голографической регистрации, обуславливает интерферометрическую чувствительность метода к смещению, второй, характерный для классической фотографии и ЧКГ-ЭПФ [3], отвечает за снижение разрешающей способности схемы регистрации. Интерферометрическая чувствительность к смещению определяется следующим выражением:

$$\frac{1 + \frac{1}{2}\alpha}{2\pi\lambda F} \alpha x(t_0)\xi(\Delta t) > \pi. \quad (5)$$

Расстояние между интерференционными полосами должно быть больше смещения любой точки объекта, в противном случае эти полосы не будут разрешены за счет уменьшения эффективной апертуры записи в плоскости регистрации, связанного со вторым слагаемым в уравнении (4). Заметим, что $x(t_0)/F$ является синусом половины угла схождения регистрирующих пучков. Итак, чувствительность ЧКГФИ-интерферометра зависит (как и в классической когерентной интерферометрии) от длины волны регистрирующего излучения λ и угла схождения регистрирующих пучков, а также (в отличие от когерентной интерферометрии) и от разности коэффициентов увеличения изображения α в плечах регистрирующего интерферометра.

Таким образом, появляется дополнительная возможность аппаратно снижать чувствительность ЧКГ-интерферометрии. Заметим, что если размер области регистрации в объектной плоскости сравним с расстоянием от центра этой области до оси схемы регистрации, то чувствительность метода в определенной точке объекта ЧКГФИ-интерферометрии, как и в случае когерентной интерферометрии (когда угол между лучом, идущим от точек объекта, и опорным лучом существенно связан с положением точки на объекте), зависит от расположения этой точки.

2. ЧКГФИ с отсутствием центральной симметрии

Рассмотрим теперь, что происходит при регистрации ЧКГФИ, если угол относительного разворота пучков отличается от 180° . Используем в плоскости регистрации и в плоскости объекта полярную систему координат (рис.2). Пусть в объектной плоскости в точке r, φ находится точечный объект. Если один из пучков повернут на угол $-\alpha/2$, а второй на $+\alpha/2$, то координатами точек в объектной плоскости будут $r, \varphi - \alpha/2$ и $r, \varphi + \alpha/2$.

Разность путей, которая возникает в плоскости регистрации в точке r', φ' в результате прохождения света через плечи регистрирующего интерферометра, есть

$$\begin{aligned} \Delta R = & \left\{ F^2 + \left[r' \cos \varphi' - r \cos \left(\varphi + \frac{\alpha}{2} \right) \right]^2 \right. \\ & \left. + \left[r' \sin \varphi' - r \sin \left(\varphi + \frac{\alpha}{2} \right) \right]^2 \right\}^{1/2} \\ & - \left\{ F^2 + \left[r' \cos \varphi' + r \cos \left(\varphi - \frac{\alpha}{2} \right) \right]^2 \right. \\ & \left. + \left[r' \sin \varphi' + r \sin \left(\varphi - \frac{\alpha}{2} \right) \right]^2 \right\}^{1/2} \end{aligned}$$

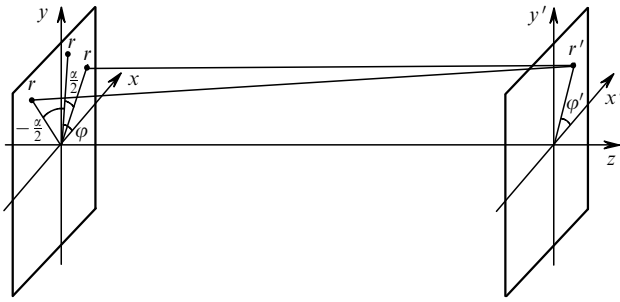


Рис.2. Схема ЧКГФИ:

r, φ – реальные полярные координаты точки на объекте; $r, \varphi - \frac{1}{2}\alpha$ – координата точки на объекте, видимая из точки r' в плоскости регистрации при распространении света через первое плечо интерферометра; $r, \varphi + \frac{1}{2}\alpha$ – координата точки на объекте, видимая из точки r' в плоскости регистрации при распространении света через второе плечо интерферометра.

$$+ \left[r' \sin \varphi' + r \sin \left(\varphi - \frac{\alpha}{2} \right) \right]^2 \}^{1/2}. \quad (6)$$

Разложив (6) в ряд Тэйлора и оставив члены до второго порядка, получим

$$\Delta R \approx -\frac{rr'}{F} \left\{ \cos \varphi' \left[\cos \left(\varphi + \frac{\alpha}{2} \right) + \cos \left(\varphi - \frac{\alpha}{2} \right) \right] + \sin \varphi' \left[\sin \left(\varphi + \frac{\alpha}{2} \right) + \sin \left(\varphi - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \right\}. \quad (7)$$

Соответственно разность фаз

$$\Delta \Phi \approx -\frac{rr'}{\pi \lambda F} \cos(\varphi' - \varphi) \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (8)$$

Если за время экспозиции точка объекта смещается на Δr и $\Delta \varphi$, то разность фаз также изменяется:

$$\delta \Phi \approx -\frac{\cos \frac{1}{2}\alpha}{\pi \lambda F} r' [(r + \Delta r) \cos(\varphi' - \varphi + \Delta \varphi) - r \cos(\varphi' - \varphi)]. \quad (9)$$

В схеме ЧКГФИ (в отличие от ЧКГФИ) изменение фазы вследствие смещения объекта, как и в вырожденном случае ЧКГ-ЭПФ, линейно зависит от координаты в плоскости регистрации. Поскольку отсутствует слагаемое, не зависящее от координаты в плоскости регистрации, то всегда существует хотя бы малая область вблизи оси вращения, в которой при любом смещении объекта запись будет осуществлена. Регистрация интерферограммы в ЧКГФИ невозможна, поэтому этот случай, вне зависимости от угла относительного поворота пучков, имеет тот же характер чувствительности к смещению в области объекта, что и вырожденный случай ЧКГ-ЭПФ [3].

3. О разрешении и когерентности при регистрации ЧКГФИ и ЧКГФИ

При рассмотрении различных вариантов ЧКГ необходимо отслеживать соотношение характерных размеров – радиуса когерентности, разрешающей способности схемы регистрации и смещения точек объекта. Разрешающая способность схемы регистрации ЧКГ не может превышать радиус когерентности – это заложено в самом методе ЧКГ. С другой стороны, как следует из (4), (9),

итоговое разрешение в точке на объектной плоскости будет не больше смещения в этой точке. Для повышения дифракционной эффективности записываемой голограммы желательно, чтобы радиус когерентности был как можно ближе к требуемому разрешению. Что касается длины когерентности, то она должна быть не меньше максимальной разности оптических путей от любой точки на объекте до любой точки на голограмме, возникающей при прохождении света через разные плечи интерферометра.

Заключение

Таким образом, рассмотрено использование схем ЧКГФИ и ЧКГФИ при регистрации динамических объектов. Показано, что ЧКГФИ при коэффициенте масштабного преобразования, отличном от -1 , обладает интерферометрической чувствительностью. В этом случае чувствительность к смещению зависит не только от длины волны регистрирующего излучения и угла схождения регистрирующих пучков, но и от коэффициента масштабного преобразования схемы регистрации. Появляется возможность дополнительно аппаратно снижать чувствительность метода ЧКГ-интерферометрии. Такое снижение сопровождается уплощением изображения объекта, что может упростить автоматическую обработку интерферограммы за счет уменьшения числа необходимых для разрешения плоскостей сканирования по глубине, а в ряде случаев позволит вообще отказаться от сканирования по глубине.

Следует отметить, что ЧКГФИ не обладает интерферометрическим характером чувствительности к смещению объекта во время регистрации и, таким образом, позволяет регистрировать объекты, смещение которых за время экспозиции значительно превышает длину волны регистрирующего излучения. Что касается размера элемента разрешения, то для обеих схем он не может быть меньше радиуса когерентности регистрирующего излучения и смещения точки объекта во время регистрации.

1. Быковский Ю.А., Зарубин А.М., Ларкин А.И. *Квантовая электроника*, **13**, 1770 (1986).
2. Ribak E, Roddier C., Roddier F., Breckinridge J. *Appl. Optics*, **27**, 1183 (1988).
3. Аверьянов С.Г., Доценко К.А., Ларкин А.И. *Квантовая электроника*, **23**, 845 (1996).
4. Гудмен Дж. *Статистическая оптика* (М., Мир, 1988).
5. Lowenthal S.L. et al. *Optics Comms*, **1**, 438 (1970).
6. Аверьянов С.Г. и др. *Квантовая электроника*, **21**, 697 (1994).

S.G.Aver'yanov, A.I.Larkin. Specific features of partially coherent holography of dynamic objects.

A method for recording partially coherent holographic interferograms is proposed, which makes it possible to control by instrumental means the sensitivity to the object point displacement. In this case, a decrease in sensitivity is accompanied by a decrease in the depth of the reconstructed image, which simplifies automated inputting of the resulting interferogram into a computer for further processing. The calculations showed that the partially coherent holograms using transverse scale transformation in one of the arms of a recording interferometer with a scale factor different from -1 possess interferometric sensitivity, whereas the partially coherent holograms with the wavefront rotation in one of the arms of a recording interferometer lack interferometric sensitivity to the displacement of object points during recording. The latter feature makes it possible to record objects whose displacement considerably exceeds the wavelength of recording radiation.