

УДК 535.41:778.38

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ ДВА ОПОРНЫХ ПУЧКА

Ю.Х. Исманов, Т.Д. Тынышова, Н.М. Кулмурзаев

Рассматриваются эффекты, которые проявляются при восстановлении радужных голограмм когерентным излучением. Эти эффекты позволяют преодолеть препятствия, которые мешают использовать обычную радужную голографию в целях голографической интерферометрии. Показано, что обнаруженные эффекты дают возможность использовать радужную голографию, как в интерферометрии реального времени, так и в методе двойной экспозиции.

Ключевые слова: радужная голография; голографическая интерферометрия; метод Габора; проекционное изображение; интерферограмма.

HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY USING TWO REFERENCE BEAMS

Y.Kh. Ismanov, T.D. Tynyshova, N.M. Kulmurzaev

The article deals with the effects that appear during the reconstruction of rainbow holograms by coherent radiation. These effects allow you to overcome obstacles that prevent the use of conventional rainbow holography for holographic interferometry. It is shown that the observed effects make it possible to use rainbow holography, both in real-time interferometry and in the double exposure method.

Keywords: rainbow holography; holographic interferometry; the Gabor method; projection image; interferogram.

Введение. Возможности интерферометрии на основе голографии значительно расширились после возникновения радужной голографии. Однако она имеет ряд недостатков, среди которых наличие в схеме записи узкой апертурной щели приводит к тому, что при записи используется очень малая доля энергии объектной волны. В результате этого возникает сильный спекл-шум, а также высокая неравномерность контраста в восстановленном изображении, что приводит к необходимости использования при записи сложной и громоздкой оптики.

Основное достоинство – возможность наблюдать интерферограмму с помощью белого света, а также то обстоятельство, что областью локализации изображения является сама голограмма. Однако наличие в схеме записи щели исключает возможность использования радужной голограммы в интерферометрии.

Отсутствие рассеивателя в схемах изучения прозрачных сред позволяет использовать когерентную световую волну для просвечивания объекта. Преимуществами такого подхода являются: простота используемой установки, максимальное использование энергии излучения, простота опи-

сания картины интерференции, отсутствие спекла изображения. Помимо этого, отсутствие рассеивателя в схемах записи позволяет использовать многомодовые лазеры в качестве источника освещения, так как отпадает проблема совмещения модовых структур объектного и опорного лучей.

Интерферометрия фазовых сред на основе бесщелевого метода. В работах [1–6] показано, что при использовании когерентного света для освещения голограммы транспарантов с амплитудным пропусканием, происходит восстановление проекционных изображений объекта в низких дифракционных порядках. Радужное изображение возникает при восстановлении голограммы параллельным пучком белого света. Восстановление белым светом, рассеянным с помощью диффузора, приводит к возникновению монотонного изображения объекта. При сложении этих изображений возникает картина интерференции.

Голографическая интерферометрия фазовых сред имеет некоторые особенности, которые обусловлены свойствами голограммы прозрачных сред, при записи их с использованием бесщелевого метода.

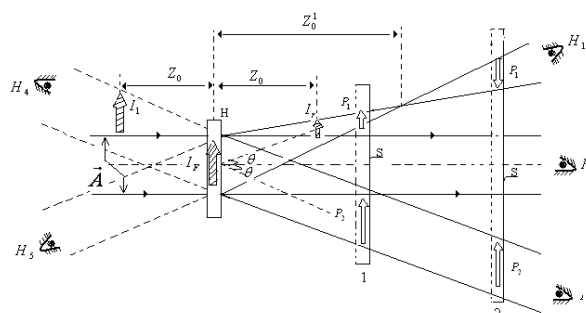


Рисунок 1 – Обобщенная схема восстановления голограммы волной \vec{A} , имеющей плоский фронт: H – голограмма; I_r , I_l и I_F – изображения объекта в действительном и мнимом областях пространства и сфокусированное изображение; P_1 и P_2 – проекции объектного изображения; S – плоскость экрана; 1, 2 – положения плоскости экрана S в пространстве

Интерферометрия фазовых сред чаще всего рассматривает среды со слабым изменением неоднородностей среды. То есть критерий “тенево-

го” приближения $z \leq \frac{0.2l_{\min}^2}{\lambda}$, где l_{\min} – наименьшее

значение неоднородности светового поля вблизи плоскости объекта; z – наибольшее значение расстояния от плоскости объекта до плоскости голограммы; λ – длина волны объектного пучка света, несомненно, реализуется в пределах, ограниченных исследовательской лабораторией. Это означает, что отпадает необходимость использования изображающей линзы при записи интерферограмм. Вследствие этого формирующиеся при восстановлении голограммы проекционные изображения получают достаточно четкими на больших расстояниях от плоскости голограммы. Основой бесцелевой радужной голографии является внеосевая схема записи голограммы. Поэтому появляется возможность ее использования в интерферометрических исследованиях на основе голографических методов двух экспозиций или реального времени.

Проведем анализ процесса записи интерферограмм фазовых сред с помощью голографического метода двух экспозиций. Показатель преломления фазовой среды представим в следующем виде [3–8]:

$$n_j = n_{0j} + n_j^1(x_0, y_0). \quad (1)$$

Здесь $j = 1, 2$ – номера экспозиций; n_{0j} и n_j^1 – результат представления показателя преломления среды в виде суммы двух составляющих – постоянной и переменной. Рассмотрим вначале процесс записи голограмм с помощью двух плоских волн: объектной \vec{a} , которая падает под углом θ к оси голограммы, и опорной \vec{A} . В этом случае,

в соответствии с методом Габора, объектную волну, которая прошла сквозь объект, можно записать в следующем виде:

$$\vec{a}_j(x, y) = a_{0j} \exp(i\varphi_{0j}) + a_j^1 \exp(i\varphi_j). \quad (2)$$

Здесь a_{0j} , φ_{0j} – значения амплитуды и фазы недифрагированной составляющей, т. е. составляющей волны с нулевой пространственной частотой. Эти характеристики постоянны по сечению светового луча. Составляющая волны, имеющая ненулевую пространственную частоту, имеет значения амплитуды и фазы a_j^1 , φ_j . В промежутке между двумя экспозициями изменение состояния фазовой среды не приводит к изменению амплитуд обеих составляющих объектной волны $a_{02} = a_{01} = a_0$, $a_1^1 = a_2^1 = a_1$, однако фазы при этом изменяются ($\varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi$, $\varphi_{02} = \varphi_{01} + \Delta\varphi_0$). Рассмотрим случай постоянства продольного размера даже при условии, что состояние фазовой среды меняется, что означает $\Delta\varphi_0 = 0$.

Учитывая эти условия, результат двух экспозиций на фотопластинке можно представить в следующем виде:

$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) = 2(A^2 + a_0^2 + a_1^2) + 4a_0a_1 \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \cos[\varphi_{01} - (\varphi_1 + \frac{\Delta\varphi}{2})] + 4Aa_0 \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \cos[\gamma + (\varphi_1 + \frac{\Delta\varphi}{2})] + 4Aa_1 \cos(\gamma + \varphi_{01}). \quad (3)$$

Здесь $\gamma = 2\pi ax$ – значение пространственной частоты ($a = \sin\theta/\lambda$), λ – длина исходной волны; A^2 – фон; a_0^2 – засветка от когерентной составляющей; a_1^2 – расфокусированное негативное изображение записываемого предмета. Основой этого выражения являются три слагаемых, описывающих интерференцию.

Первое слагаемое

$$4a_0a_1 \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \cos[\varphi_{01} - (\varphi_1 + \frac{\Delta\varphi}{2})]$$

показывает, как изменяется объект во временном промежутке между двумя экспозициями. Это слагаемое формирует голограмму Габора.

Второе слагаемое

$$4Aa_1 \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \cos[\gamma + (\varphi_1 + \frac{\Delta\varphi}{2})]$$

описывает интерференционную картину, имеющую пространственную частоту a . Данное слагаемое представляет собой голограмму Френеля.

Третье слагаемое $Aa_0 \cos(\gamma + \varphi_{01})$ можно рассматривать как математическую запись голографической линзы. Критерием формирования качественной габоровской голограммы и высокой эффективности голографической линзы является условие $a_{01} \geq a_1$, которое для прозрачных сред

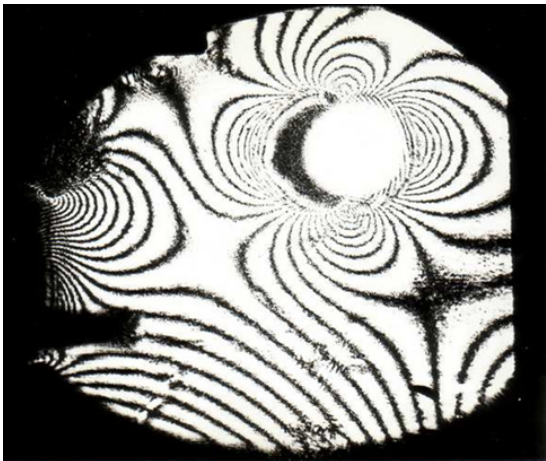


Рисунок 2 – Интерферограмма фазовой среды

является обязательным. При восстановлении подобной голограммы исходной опорной волной волна, прошедшая голограмму, будет дифрагировать в трех направлениях: вдоль оси, перпендикулярной плоскости голограммы и в направлениях, составляющих с осью углы $\pm\theta$. Вследствие восстановления данной голограммы интерференционные картины, относящиеся к мнимому I_r действительному I_r и “сфокусированному” I_f изображениям, видны в направлениях $\pm\theta$ (рисунок 1).

Помимо этих изображений, вдоль оси голограммы можно наблюдать интерферограмму, которая представляет собой изображение Габора. Перенос интерферограммы в данном случае также обусловлен голографической линзой. Интерферограмма возникает как результат сложения проекционных изображений объекта P_1 и P_2 . Указанные интерференционные картины, которые являются результатом сложения изображений, восстанавливаемых в направлениях θ и $-\theta$, можно зафиксировать на экране S , который устанавливается на произвольном удалении от плоскости голограммы на линии распространения волн под углами θ и $-\theta$.

Для записи голографических интерферограмм фазовых сред на основе метода двух экспозиций использовали стандартную внеосевую схему. Для имитации прозрачных сред брали кусочки оргстекла толщиной 4 мм, квадратной формы размером 5×5 см. Состояние объекта изменялось посредством его сжатия при помощи гидравлического пресса. Объект устанавливали на расстоянии 0,6 м от плоскости голограммы. Соответствующая фотохимическая обработка голограммы позволяет ее отбелить. При восстановлении голограммы белым

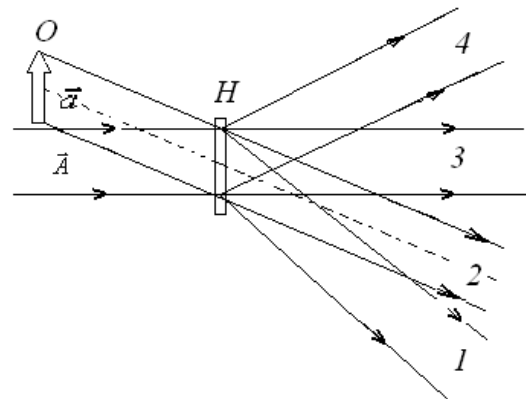


Рисунок 3 – Восстановление интерферограммы фазовой среды в реальном масштабе времени

светом в плоскости голограммы формируется четкая, насыщенная интерферограмма объекта, окрашенная в радужные цвета (рисунок 2).

Эту интерференционную картину можно наблюдать как с помощью отраженного, так и проходящего света. Образование изображений проекционного типа P_1 и P_2 при освещении голограммы, на которой записан прозрачный объект, позволяет сделать упростить методику фиксации и обработки интерференционных картин в интерферометрии пропускающих сред голографическим методом реального времени [9].

Если мы реализуем одновременное освещение записанной и обработанной на месте записи голограмму исходного состояния объекта первоначальной опорной волной \vec{A} и объектной волной \vec{a} от объекта O , который был изменен, то за плоскостью голограммы формируются четыре волны, которые распространяются в направлениях, обозначенных на рисунке 3 как 1, 2, 3, 4. Направления 1 и 4 восстанавливают действительное и мнимое изображения объекта, как в случае голограммы Френеля. В этих направлениях также восстанавливаются изображения проекционного типа этого объекта. Данная информация также может быть полезна. Направления 2 и 3 аналогичны направлениям 1 и 4, только вместо изображений исходного объекта в этом случае мы имеем интерференционные картины, образуемые как результат сложения изображений объекта в исходном и измененном состояниях. Для наблюдения этих интерференционных картин можно использовать диффузные экраны, либо регистрировать на фотопластинках, размещенных на линиях распространения волн 2 и 3.

Выводы. В интерферометрии на основе голографического метода реального времени целесообразней всего использовать интерферограммы, возникающие при сложении проекционных изображений, сформированных волнами, в которых восстанавливаются одновременно изображения исходного и измененного объектов. В этом случае полностью снимается проблема локализации полос. А это, в свою очередь, позволяет отказаться от использования специализированной оптики при наблюдении и регистрации интерферограмм; существенно уменьшить габариты систем записи, съема и обработки интерферограмм фазовых сред в реальном масштабе времени.

Литература

1. *Maripov A.* The Talbot effect (a self – imaging phenomenon) in holography / A. Maripov, Y. Ismanov // *J. Optics (Paris)*. 1995. V. 25. N. 1. P. 3–8.
2. *Maripov A.* Interferometer based on the Talbot effect in holography / A. Maripov, Y. Ismanov // *J. Optics (Paris)*. 1995. V. 26. N. 1. P. 25–28.
3. *Исманов Ю.Х.* Саморепродуцирование регулярных объектов с ограниченной апертурой / Ю.Х. Исманов, С.А. Алымкулов // *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*. 2015. № 7. С. 3–5.
4. *Исманов Ю.Х.* Интерферометрия на основе метода бесщелевой радужной голографии / Ю.Х. Исманов // *Вестник КГУСТА им. Н. Исанова*. 2015. № 4 (50). С. 194–199.
5. *Исманов Ю.Х.* Эффект саморепродуцирования в голографии / Ю.Х. Исманов, Д.А. Исмаилов, К.М. Жумалиев, С.А. Алымкулов // *Матер. VI межд. конф. по фотонике и информационной оптике: сб. научн. тр. М.: НИЯУ МИФИ*, 2017. С. 646–647.
6. *Исманов Ю.Х.* Голографический эффект Тальбота в интерферометрии / Ю.Х. Исманов // *Вестник КРСУ*. 2015. Т. 15. № 5. С. 101–103.
7. *Исманов Ю.Х.* Влияние длины волны на восстановленное изображение / Ю.Х. Исманов // *Вестник КРСУ*. 2015. Т. 15. № 5. С. 104–106.
8. *Жумалиев К.М.* Анализ голографических интерферограмм / К.М. Жумалиев, С.А. Алымкулов, Ю.Х. Исманов, Д.А. Исмаилов // *Известия КГТУ им. И. Раззакова*. 2016. № 3 (39). Ч. I. С. 56–60.
9. *Кулмурзаев Н.М.* Регистрирующие среды для голографии и радужная голография / Н.М. Кулмурзаев, Ю.Х. Исманов, Н.А. Тургунбаев // *Вестник КГУСТА*. 2014. № 1. С. 83–88.