

УДК 535.317

ЛОКАЛИЗАЦИЯ И ВИДНОСТЬ ПОЛОС В ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ И СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ С ПРОТЯЖЕННЫМ ВОССТАНАВЛИВАЮЩИМ ИСТОЧНИКОМ

И. С. Клименко, Б. Б. Горбатенко, В. П. Рябухо, Б. В. Федулеев

Рассмотрены особенности локализации интерференционных полос и распределения их видности в области локализации при получении голографических и спекл-интерферограмм в частично когерентном излучении протяженных источников.

Показано, что для наблюдения интерферограмм необходимо, чтобы величина взаимного смещения спеклов при их регистрации не разрешалась наблюдательной оптической системой и не превышала объема пространственной когерентности излучения, освещающего голограмму и спеклограмму.

Протяженность области локализации интерференционных полос и пространственное распределение их видности в зависимости от того, разрешает или не разрешает наблюдательная оптическая система площадку пространственной когерентности, определяется соответственно размерами и формой освещающего источника (а для голографических интерферограмм — еще и его временной когерентностью), а также размерами и формой апертуры наблюдательной системы.

Введение

Локализация и видность полос в классической интерферометрии с протяженными тепловыми источниками определяется когерентными свойствами световых полей. В голографической и спекл-интерферометрии с лазерными восстанавливающими источниками закономерности локализации полос и пространственного распределения их видности зависят от корреляционных свойств спекл-полей и определяются размерами и формой апертуры наблюдательной оптической системы, а также взаимным смещением спекл-полей [1, 2].

Эффект локализации полос в голографической и спекл-интерферометрии с лазерными восстанавливающими источниками к настоящему времени хорошо изучен. Однако в последнее время получили распространение голографические и спекл-интерферометрические методы с использованием на этапе регистрации и восстановления частично когерентного излучения тепловых источников света [3-5]. Эти методы имеют ряд преимуществ перед традиционными методами с лазерными источниками света, в частности они просты в реализации, возможность наблюдения интерференционных картин в полихроматическом свете протяженного источника позволяет надежно выделять неокрашенную интерференционную полосу нулевого порядка, уменьшается также пятнистость изображения [5]. До настоящего времени в литературе не обсуждались вопросы формирования и локализации интерференционных полос, наблюдаемых при использовании этих методов. В то же время очевидно, что характер формирования интерференционных полос при освещении двухэкспозиционных спеклограмм и голограмм излучением протяженного полихроматического источника будет отличаться от случая освещения когерентным лазерным излучением. Правомерно ожидать, что это отличие в первую очередь проявится в особенностях локализации полос и распределения их видности в области локализации.

Настоящая работа посвящена изучению закономерностей локализации и распределения видности интерференционных полос, наблюдаемых при осве-

цении двухэкспозиционных спеклограмм и голограмм излучением протяженных тепловых источников света. Рассмотрение проводится с позиций общности механизмов формирования полос в голографической и спекл-интерферометрии [1, 2].

Локализация полос в двухэкспозиционной спекл-интерферометрии

Рассмотрим условия формирования интерференционных полос в частично когерентном излучении на примере двухэкспозиционной спеклограммы вращательного сдвига. Такое смещение позволяет наиболее наглядно выявить поперечный характер локализации полос в голографической [1] и спекл-интерферометрии [2] при когерентном освещении.

Известно, что в спекл-интерферометрии полосы формируются в результате интерференции составляющих суперпозиционного спекл-поля рассеянных идентичными элементами взаимно смещенных спекл-структур, зарегистрированных на спеклограмме. При этом наблюдательная оптическая система, в качестве которой может служить, например, глаз или фотоаппарат, не должна разрешать взаимного смещения идентичных спеклов на спеклограмме. Это обеспечивает пространственное наложение взаимно коррелированных областей световых полей, рассеянных на несмещенной и смещенной спекл-структурах [2]. Нормированная функция взаимной корреляции этих волн $\gamma_{\text{н}}(\Delta\mathbf{r}')$, где $\Delta\mathbf{r}'$ — взаимное смещение полей в плоскости наблюдения определяется [2] как нормированный фурье-образ распределения интенсивности света в выходном зрачке наблюдательной системы.

Что же касается случая освещения спеклограммы частично когерентным излучением, то здесь необходимо учитывать также ограниченную пространственную когерентность этого излучения. Взаимная когерентность волн, рассеянных идентичными элементами спекл-структур, будет определяться, как и в интерферометре Юнга, комплексной степенью пространственной когерентности $\gamma_0(\Delta\mathbf{r})$ освещающего излучения, где $\Delta\mathbf{r}$ — вектор взаимного смещения идентичных спеклов на спеклограмме. В самом деле, поскольку идентичные спеклы на спеклограмме, имеющие взаимное поперечное смещение, освещаются волнами, взаимная когерентность которых определяется степенью пространственной когерентности освещающего излучения, то и взаимная когерентность волн, рассеянных этими спеклами, также будет определяться пространственной когерентностью освещающего излучения.

Таким образом, взаимная корреляция световых волн в плоскости изображения спеклограммы описывается произведением

$$\gamma(\Delta\mathbf{r}') = \gamma_0(\Delta\mathbf{r}') \gamma_{\text{н}}(\Delta\mathbf{r}'), \quad (1)$$

где $\gamma_0(\Delta\mathbf{r}')$ — комплексная степень пространственной когерентности, отнесенная к плоскости наблюдения (изображения спеклограммы), $\Delta\mathbf{r}' = \beta\Delta\mathbf{r}$, а β — поперечное увеличение наблюдательной оптической системы. Видность (контраст) наблюдаемых интерференционных полос также будет определяться выражением (1).

Если спеклограмма освещается пространственно когерентным излучением или излучением, у которого протяженность области пространственной когерентности заведомо превышает поперечное смещение спеклов по всей площади спеклограммы, то можно положить $\gamma_0(\Delta\mathbf{r}') \simeq 1$, и контраст полос будет определяться только размерами апертуры наблюдательной системы, т. е. мы приходим к случаю, рассмотренному в [2].

Предположим теперь, что апертура наблюдательной системы имеет столь малые размеры, что область взаимной корреляции интерферирующих полей в плоскости наблюдения при пространственно когерентном освещении существенно превышает максимальную величину взаимного смещения спеклов. Тогда можно положить $\gamma_{\text{н}}(\Delta\mathbf{r}') \simeq 1$, и в соответствии с (1) имеем $\gamma(\Delta\mathbf{r}') \simeq 1$. Ясно, что при частично когерентном освещении в этом случае видность интерференционных полос определяется только степенью пространственной когерентности освещающего излучения и величиной взаимного смещения спеклов на спеклограмме, поскольку из (1) имеем $\gamma(\Delta\mathbf{r}') \simeq \gamma_0(\Delta\mathbf{r}')$.

Рассмотрим, какой вид будет иметь спекл-интерферограмма вращательного сдвига при освещении спеклограммы частично когерентным излучением. На рис. 1 приведена схема наблюдения интерференционных полос при освещении двухэкспозиционной спеклограммы 4 излучением теплового источника 1, которое рассеивается на диффузоре (матовом стекле) 2, ограниченном диафрагмой 3. Для наблюдения в плоскости 8 интерференционных полос используется оптическая система 7 с апертурной диафрагмой 6. Длиннофокусная линза 5 служит для выравнивания освещенности в изображении спеклограммы. В силу того, что вращательный сдвиг обеспечивает центральную симметрию во взаимном смещении спеклов и линейность его приращения с удалением от центра вращения, пространственное распределение видности полос в интерференционной картине будет отражать в масштабе, зависящем от угла поворота ω , функцию пространственной когерентности освещающего излучения. Контраст полос максимален в центре вращательного сдвига и уменьшается с удалением от него, т. е. с увеличением $|\Delta \mathbf{r}|$. Полосы будут наблюдаться в ограниченной области, иначе говоря, будут локализованы там, где взаимное смещение спеклов

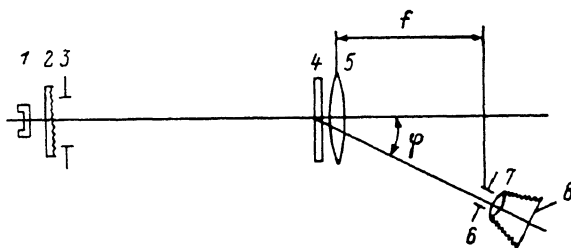


Рис. 1.

не превышает размеров площадки пространственной когерентности освещающего излучения. При изменении размеров этой площадки будут меняться размеры области локализации полос при неизменном значении угла ω .

На рис. 2, а, б приведены спекл-интерферограммы вращательного сдвига ($\omega \approx 2.36 \cdot 10^{-3}$ рад), иллюстрирующие эффект сокращения области локализации полос при увеличении угловых размеров круглого теплового источника, освещающего спеклограмму от $\alpha_1 \approx 1.8 \cdot 10^{-2}$ до $\alpha_2 \approx 6.1 \cdot 10^{-2}$ рад. Период полос определяется выражением

$$\Lambda = \frac{\bar{\lambda}}{\omega \sin \varphi}, \quad (2)$$

где $\bar{\lambda}$ — средняя длина волны освещающего излучения, φ — угол между направлениями освещения и наблюдения. Полосы параллельны плоскости, в которой лежат направления наблюдения и освещения спеклограммы.

Между функцией видности полос $V(\mathbf{r})$, где \mathbf{r} — радиус-вектор с началом в центре вращательного сдвига, и комплексной степенью пространственной когерентности $\gamma_0(\Delta \mathbf{r})$ освещающего излучения имеет место очевидная связь

$$\gamma_0(\Delta \mathbf{r}) = V([\omega \mathbf{r}]), \quad (3)$$

где ω — вектор поворота спекл-структур; квадратные скобки обозначают операцию векторного произведения.

Наиболее наглядно функциональная зависимость (3) проявляется в том случае, когда функция пространственной когерентности освещающего излучения имеет ярко выраженный осциллирующий характер. На рис. 2, в представлена спекл-интерферограмма вращательного сдвига ($\omega \approx 2.36 \cdot 10^{-3}$), полученная при использовании освещающего теплового источника, имеющего форму двух одинаковых кругов с угловыми размерами $\alpha_3 \approx 1.8 \cdot 10^{-2}$ и угловым расстоянием между их центрами $\alpha_4 \approx 4.6 \cdot 10^{-2}$. Видность полос осциллирует с пространственной частотой, пропорциональной углу поворота ω и угловому расстоянию α_4 между центрами источников. При этом наблюдается обращение кон-

траста полос при переходе через область с нулевой видностью, что объясняется изменением знака функции пространственной когерентности излучения для соответствующих значений $|\Delta r|$ (изменением фазы $\gamma_0(\Delta r)$ на π рад). Размеры области, в которой наблюдаются интерференционные полосы, определяются величиной угла поворота ω и угловым диаметром α_s источника света.

Если использовать протяженный когерентный источник (матовое стекло 2 на рис. 1, освещенное лазерным излучением), то получаемые спекл-интерферограммы практически не отличаются от приведенных на рис. 2, наблюдается только более заметная пятнистость изображения. Это свидетельствует о совпа-

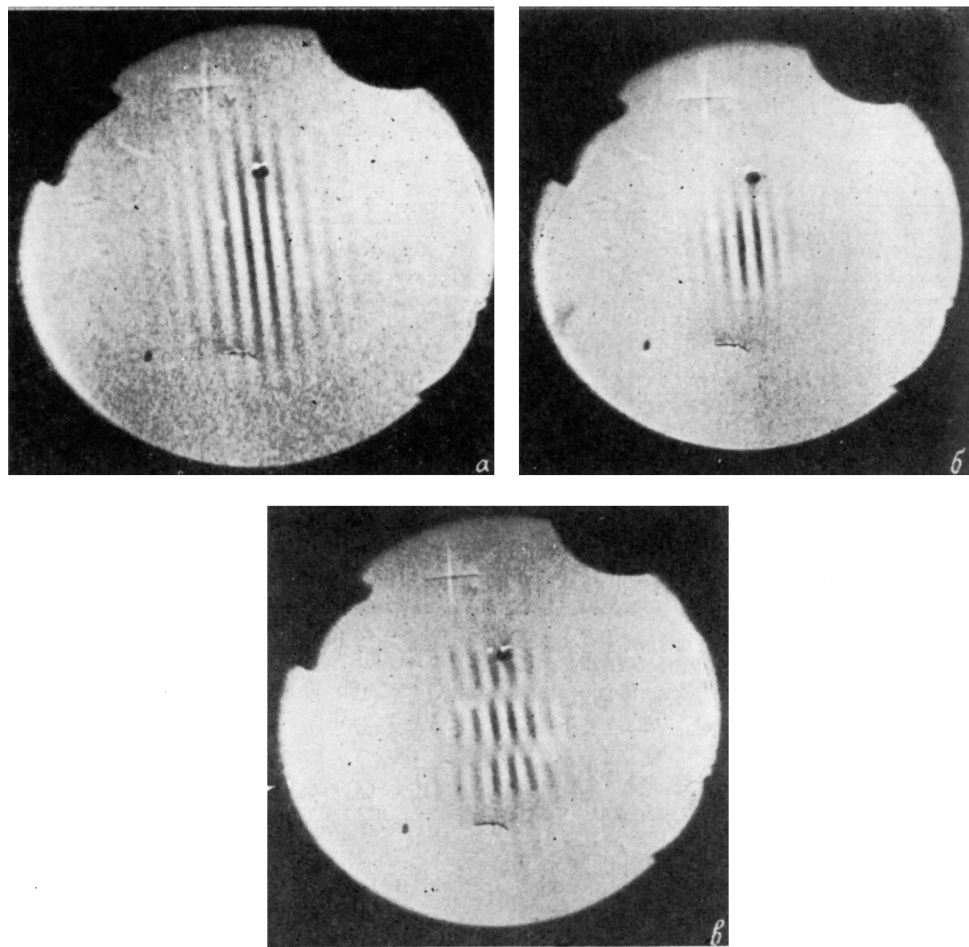


Рис. 2.

дении пространственных корреляционных свойств лазерных спекл-полей и световых полей тепловых источников.

Из выражения (3) следует, что измерение распределения видности в спекл-интерферограмме вращательного сдвига позволяет определять функцию пространственной когерентности излучения.

Таким образом, поперечное распределение видности полос на спекл-интерферограмме, получаемой при освещении двухэкспозиционной спеклограммы излучением протяженного источника, определяется функцией пространственной когерентности излучения в области спеклограммы, если наблюдательная оптическая система имеет достаточно малую угловую апертуру. В общем случае на распределение видности полос оказывает влияние как пространственная когерентность освещающего излучения, которая определяется распределением

интенсивности по источнику, так и размеры и форма апертуры наблюдательной системы, которые определяют поперечные корреляционные свойства излучения в плоскости наблюдения интерференционной картины.

Локализация полос в голографической интерферометрии сфокусированных изображений

Голограммы сфокусированных изображений позволяют восстанавливать неискаженные изображения с интерференционными полосами при использовании протяженного когерентного источника света [6]. Рассмотрим влияние когерентности восстанавливающего излучения на локализацию этих полос. Как и в случае спекл-интерферометрии, будем рассматривать вращательный сдвиг объекта. Принимая во внимание равную чувствительность методов голографической и спекл-интерферометрии к поперечному смещению объекта [6] и аналогичные механизмы формирования интерференционных картин при реализации

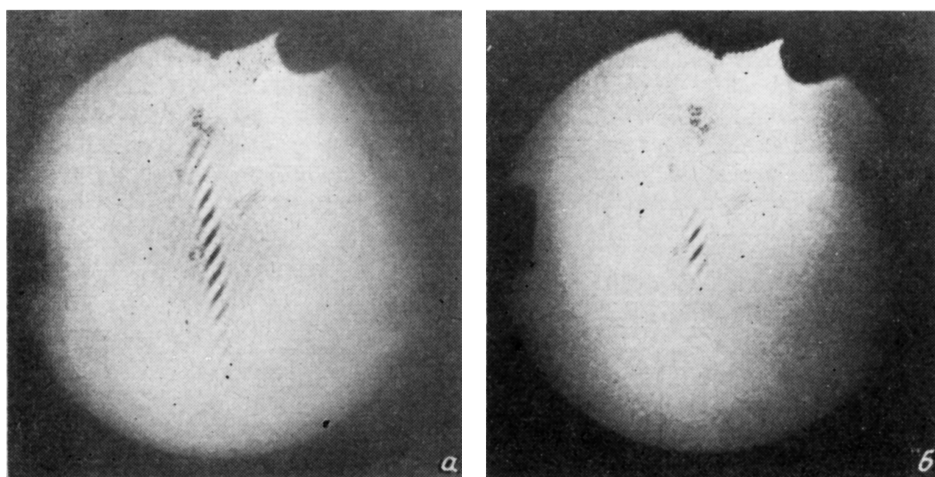


Рис. 3.

этих методов, можно было бы ожидать, что голографические интерферограммы вращательного сдвига будут иметь такой же вид, как и спекл-интерферограммы, приведенные на рис. 2. Действительно, при освещении когерентным (лазерным) источником голографические и спекл-интерферограммы выглядят одинаково. Однако использование наклонного опорного пучка при записи голограммы и соответственно необходимость использования наклонного восстанавливающего пучка в случае частично когерентного освещения существенно меняет дело, оказывая влияние на протяженность области локализации интерференционных полос.

На рис. 3 приведены голографические интерферограммы вращательного сдвига ($\omega \approx 2.3 \cdot 10^{-3}$), полученные при использовании теплового восстанавливающего источника света, имеющего круглую форму с угловыми размерами $\alpha_5 \approx 2.1 \cdot 10^{-2}$ (а) и $\alpha_6 \approx 6.1 \cdot 10^{-2}$ (б). Схема наблюдения интерференционной картины отличалась от схемы на рис. 1 лишь тем, что угол падения освещающего пучка на голограмму составлял $\theta \approx 47.3^\circ$. Период полос определяется соотношением (2), где в качестве угла φ следует брать угол между оптической осью наблюдательной системы и нормалью к голограмме, поскольку в нашем эксперименте ось вращательного сдвига зарегистрированных голографических изображений совпадала с нормалью к голограмме (см. [1]). Для наглядности направление наблюдения было выбрано таким образом, чтобы плоскость, в которой лежат направления наблюдения и нормаль к голограмме (полосы параллельны этой плоскости), не была параллельна плоскости падения восстанавливающего

пучка света. Как и в рассмотренном выше случае наблюдения спекл-интерферограмм, апертура наблюдательной оптической системы имела достаточно малые размеры, чтобы взаимное смещение идентичных точек изображений не разрешалось оптической системой, и вид интерференционной картины определялся только когерентными свойствами освещающего излучения. Интерференционные полосы в этом случае, как и в спекл-интерферометрии, формируются в лучах света, рассеянных идентичными спеклами микроинтерференционных голограммных структур, соответствующих исходному и смещенному положениям объекта. Эти спеклы отличаются от спеклов на спеклограмме только тем, что они промодулированы высокочастотной интерференционной пространственной несущей, период которой определяется углом θ между опорным и предметным пучками при записи голограммы.

Как видно из рис. 3, область поперечной локализации имеет вытянутую форму вдоль направления (ось x), параллельного плоскости падения освещающего пучка на голограмму. Такая форма области локализации полос вызвана влиянием временной когерентности света и объясняется тем, что при вращательном сдвиге направления взаимного смещения идентичных спеклов на голограмме составляет различный угол с направлением распространения освещающего пучка. По оси x это смещение перпендикулярно направлению освещения, и протяженность области локализации определяется размером площадки пространственной когерентности излучения. В ортогональном направлении (ось y) взаимное смещение идентичных спеклов на голограмме составляет угол ($\theta=90^\circ$) с направлением распространения освещающего пучка, и протяженность области локализации определяется объемом пространственной когерентности освещающего излучения или длиной временной когерентности рассеянного излучения. Здесь имеется в виду временная когерентность света, дифрагированного на голограмме в данном направлении наблюдения, поскольку необходимо учитывать селективные свойства голограммы как дифракционного элемента.

Область пространственной когерентности света занимает объем [7], продольные размеры которого существенно превышают поперечные. Длина временной когерентности определяется спектральным составом излучения и может быть как меньше, так и больше глубины объема пространственной когерентности. В нашем случае для восстановления голографического изображения использовался свет теплового источника, имеющий весьма малую длину временной когерентности, значительно меньшую глубины объема пространственной когерентности. Поэтому по оси y протяженность области локализации интерференционных полос ограничивалась именно значением длины временной когерентности света. В противном случае область локализации имела бы овальную форму, несколько вытянутую по оси y , так как идентичные спеклы на голограмме вдоль оси y находились бы в пределах области пространственной когерентности при больших значениях их взаимного смещения, чем по оси x . Такие интерферограммы наблюдаются при восстановлении изображения лазерным излучением, рассеянным на матовом стекле.

Определим протяженность области локализации полос по оси y . Принимаямая $\bar{\lambda} \approx 0.5$ мкм (изображение наблюдалось в зеленом свете), а $\Delta \lambda \approx 0.1$ мкм, получим длину когерентности $l_k = \bar{\lambda}^2 / \Delta \lambda \approx 2.5$ мкм. Разность хода лучей, рассеянных идентичными спеклами, $\delta = \Delta r (\sin \theta - \sin \varphi)$, где $\Delta r = \omega y$ — взаимное смещение идентичных спеклов. Видность полос равна нулю при $\delta = l_k$, отсюда протяженность области локализации

$$2y_0 = \frac{l_k}{\omega (\sin \theta - \sin \varphi)}. \quad (4)$$

Подставляя в (4) экспериментальные данные ($\varphi \approx 9^\circ$) и рассчитанное значение l_k , получим $2y_0 \approx 3.8$ мм, что примерно равно измеренному по рис. 3 значению этого параметра.

Следует отметить, что разность хода δ определяет временную задержку между фазами колебаний световых волн, но не значение разности фаз этих колебаний. Разность фаз «кодируется» на голограмме взаимным положением картин несущей

щих интерференционных полос в идентичных спеклах и определяется [8] суммой проекций вектора смещения объекта на направления наблюдения и освещения объекта при записи голограммы.

Заключение

Закономерности образования голографических и спекл-интерферограмм в частично когерентном излучении свидетельствуют о том, что для их наблюдения необходимо выполнение одновременно двух условий. Во-первых, величина взаимного смещения спеклов в плоскости регистрации голограммы и спеклограммы не должна разрешаться наблюдательной оптической системой, и, во-вторых, величина этого смещения не должна превышать глубину объема пространственной когерентности освещающего излучения.

Если при выполнении этих условий оптическая система не разрешает площадки пространственной когерентности освещающего излучения, то протяженность области локализации интерференционных полос и пространственное распределение их видности определяется функцией пространственной когерентности (размерами и формой) освещающего источника, а в голографической интерферометрии еще и временной когерентностью.

В случае, если площадка пространственной когерентности разрешается оптической системой, пространственное распределение видности интерференционных полос определяется корреляционными свойствами спекл-поля, формируемого вследствие диффузного рассеяния, освещающего измерения на спекл-структуре голограммы (спеклограммы), т. е. размерами и формой апертуры наблюдательной системы. В этом случае можно говорить о том, что пространственно-когерентные свойства излучения, претерпевшего диффузное рассеяние, не передаются оптической системой, а трансформируются ею.

Литература

- [1] Клименко И. С., Рябухо В. П., Федулев Б. В. ЖТФ, 1985, т. 55, № 7, с. 1338—1346.
- [2] Клименко И. С., Рябухо В. П., Федулев Б. В. ЖТФ, 1986, т. 56, № 9, с. 1749—1756.
- [3] Власов Н. Г., Штанько А. Е. Опт. и спектр., 1977, т. 43, № 1, с. 192—194.
- [4] Воопе Р. М., Де Ваккер Л. С. Optik, 1976, v. 44, N 3, p. 343—345.
- [5] Власов Н. Г., Мацонашвили Р. Б., Штанько А. Е., Горшков В. И. Спекл-интерферометрия. М.: ВНИИКИ, 1984, № 1. 52 с.
- [6] Клименко И. С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. М.: Наука, 1985. 224 с.
- [7] Сороко Л. М. Основы голографии и когерентной оптики. М.: Наука, 1971. 816 с.
- [8] Вест Ч. Голографическая интерферометрия (Пер. с англ.) / Под ред. Ю. И. Островского. М.: Мир, 1982. 504 с.

Институт повышения квалификации
руководящих работников и специалистов
Министерства промышленности средств связи
Москва

Поступило в Редакцию
2 апреля 1987 г.