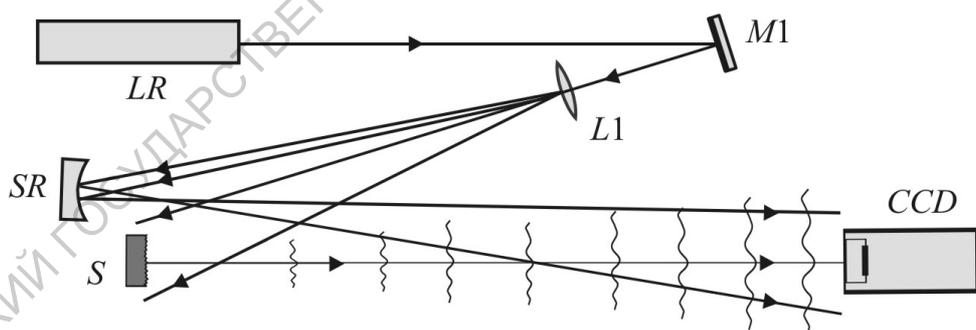


# МЕТОДЫ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ



ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского»

Научно-образовательный институт оптики и биофотоники СГУ  
Институт проблем точной механики и управления РАН

В.П. Рябухо, О.А. Перепелицына, Л.А. Максимова

# МЕТОДЫ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Учебно-методическое пособие

Саратов

2014 г.

Настоящее учебно-методическое пособие направлено на рассмотрение теоретических основ методов цифровой голографической интерферометрии и содержит методическое руководство к выполнению лабораторной работы. Учебно-методическое пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 03.03.02 «Физика» и 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» (уровень бакалавриата и магистратуры), а также может быть использовано в аспирантуре по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия».

## СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	5
Методы цифровой голографической интерферометрии .....	5
Влияние спекл-модуляции восстановленного изображения .....	10
Оптические схемы записи цифровых голограмм в методе голографической интерферометрии .....	15
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ .....	19
Задание 1. Разработка оптической схемы записи цифровых фурье-голограмм для реализации метода цифровой голографической интерферометрии и расчет параметров схемы .....	20
Задание 2. Запись серии цифровых фурье-голограмм объекта, соответствующих различным пространственным положениям поверхности объекта, и численное восстановление голографических изображений-интерферограмм .....	21
Задание 3. Запись серии цифровых голограмм сфокусированного изображения объекта, соответствующих различным пространственным положениям объекта, и численное восстановление голографических изображений-интерферограмм .....	22
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ .....	23
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	25

САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### **Методы цифровой голографической интерферометрии**

Интерферометрия – это совокупность методов и средств измерения и обработки информации, основанных на интерференции волн. В аналоговой голографической интерферометрии по крайней мере одна из интерферирующих волн восстанавливается с голограммы, а другая волна – реальная от исследуемого объекта. В этом случае говорят о голографической интерферометрии реального времени. В двухэкспозиционной голографической интерферометрии обе интерферирующие волны восстанавливаются с голограммы.

Очевидно, в цифровой голографии возможна реализация только двухэкспозиционного метода голографической интерферометрии, поскольку в цифровой голографии не восстанавливается реальная волна, а восстанавливается только ее математический образ в числовой форме представления.

Согласно этому методу записываются цифровые голограммы одного и того же объекта в его различных состояниях, отличающихся или пространственным положением, или измененной формой поверхности вследствие деформации и т.п. Можно записать довольно большое число таких голограмм, соответствующих многим последовательным состояниям объекта, а не только две голограммы на один и тот же фоторегистратор, как в аналоговой голографии.

С каждой цифровой голограммы возможно восстановление в числовой форме комплексной амплитуды поля на поверхности объекта:

$$U_j(\vec{\rho}_0) = A_j(\vec{\rho}_0) \exp[i\varphi_j(\vec{\rho}_0)] , \quad (1)$$

где индекс  $j$  обозначает номер состояния объекта.

Комплексные амплитуды объектного поля, соответствующие различным состояниям объекта, отличаются из-за изменения пространственного положения объекта.

В реальном аналоговом процессе интерференция волн проявляется в наблюдении изменения интенсивности суммарного волнового поля в зависимости от разности фаз этих волн. С математической точки зрения интенсивность монохроматического поля определяется как квадрат модуля комплексной амплитуды суммарного поля

$$\begin{aligned} I_{jk}(\vec{\rho}_0) &= |U_j(\vec{\rho}_0) + U_k(\vec{\rho}_0)|^2 = |U_j|^2 + |U_k|^2 + 2 \operatorname{Re} U_j U_k = \\ &= I_j + I_k + 2A_j A_k \cos[\varphi_j(\vec{\rho}_0) - \varphi_k(\vec{\rho}_0)] , \end{aligned}$$

(2)

где  $j$  и  $k$  определяют различные состояния объекта.

Если амплитуды и, соответственно, интенсивности полей не изменяются, а изменяются только фазы полей, по уравнение (1) упрощается и принимает вид

$$I_{jk}(\vec{\rho}_0) = 2I_1(\vec{\rho}_0) [1 + \cos[\Delta\varphi_{jk}(\vec{\rho}_0)]] , \quad (3)$$

где  $\Delta\varphi_{jk}(\vec{\rho}_0) = \varphi_j(\vec{\rho}_0) - \varphi_k(\vec{\rho}_0)$  – пространственное распределение разности фаз объектных полей, соответствующих различным состояниям объекта.

Таким образом, в варианте цифровой голографии для реализации метода голографической интерферометрии вычисляется квадрат модуля сум-

мы восстановленных комплексных амплитуд объектных полей, соответствующих различным пространственным состояниям объекта.

Получаемое действительное числовое изображение  $I_{jk}(\vec{\rho}_0)$  согласно уравнениям (1) и (2) оказывается промодулированным косинусоидальной функцией, зависящей от разности фаз  $\Delta\varphi_{jk}(\vec{\rho}_0)$  объектных полей. В аналоговой голографической интерферометрии эта модуляция проявляется в виде системы интерференционных полос, образующихся на восстановленном голографическом изображении. В цифровой голографической интерферометрии эта модуляция на графическом изображении имеет совершенно аналогичный вид: суммарное изображение объекта покрыто системой интерференционных полос – восстанавливается голографическое изображение-интерферограмма. На рис. 1 приведены голографические суммарные изображения с интерференционными полосами, восстановленное с двухэкспозиционной аналоговой голограммы и полученное в результате численной обработки цифровых голограмм.

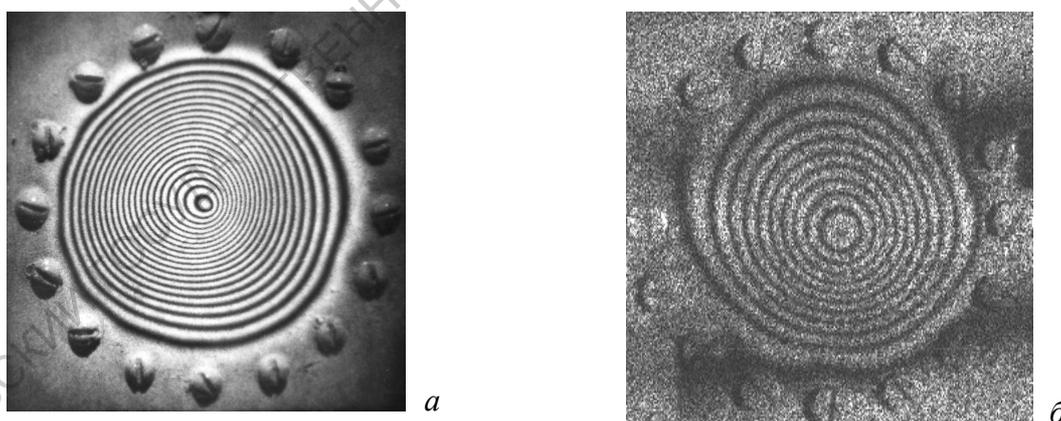


Рис. 1. Аналоговая (а) и цифровая (б) голографические изображения-интерферограммы деформации мембраны под действием сосредоточенной силы

Система интерференционных полос, их форма, пространственная частота определяются величиной и видом пространственного смещения поверхности отражающего объекта, поскольку величина разности фаз

$\Delta\varphi_{jk}(\vec{\rho}_0)$  для каждой точки поверхности объекта определяется величиной и направлением смещения этой точки – вектором смещения  $\vec{g}(\vec{\rho}_0)$ . На рис. 2 приведена схема хода лучей для определения  $\Delta\varphi_{jk}(\vec{\rho}_0)$  в зависимости от  $\vec{g}(\vec{\rho}_0)$ .

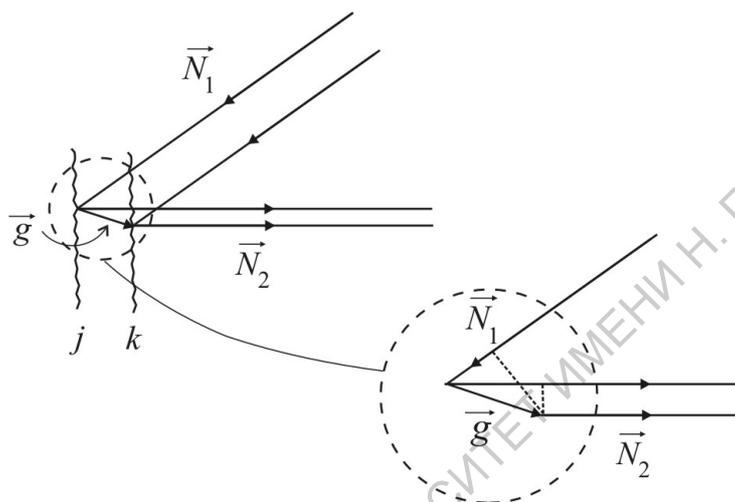


Рис. 2. К расчету разности фаз объектных полей, возникающей при смещении поверхности объекта:  $\vec{g}$  – вектор смещения точки поверхности;  $j$  и  $k$  – два положения поверхности объекта;  $\vec{N}_1$  и  $\vec{N}_2$  – единичные векторы освещающей волны и отраженной в данном направлении

Сумма проекций вектора  $\vec{g}$  на направление освещения  $\vec{N}_1$  и направление отражения  $\vec{N}_2$  определяет разность хода волн от источника до фоторегистратора,

$$\Delta_{jk} = -\vec{g}\vec{N}_1 + \vec{g}\vec{N}_2, \quad (4)$$

где учтены направления векторов  $\vec{N}_1$  и  $\vec{N}_2$ . Отсюда для разности фаз получаем выражение:

$$\Delta\varphi_{jk}(\vec{\rho}_0) = \frac{2\pi}{\lambda} g(\vec{\rho}_0) [\vec{N}_2 - \vec{N}_1], \quad (5)$$

где  $\lambda$  – длина волны используемого света.

Поскольку в общем случае вектор смещения различных точек поверхности  $\vec{g}(\vec{\rho}_0)$  может быть различным и по величине, и по направлению, то разность фаз  $\Delta\varphi_{jk}(\vec{\rho}_0)$  оказывается зависимой от координат  $\vec{\rho}_0(x_0, y_0)$ . Пространственное изменение  $\Delta\varphi_{jk}(\vec{\rho}_0)$  влечет за собой и пространственное изменение интенсивности суммарного поля  $I_{jk}(\vec{\rho}_0)$  согласно (2) или (3), и появление светлых и темных полос на восстановленном суммарном изображении объекта. Светлые полосы появляются там, где  $\Delta\varphi_{jk} = 2\pi m$ ,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , темные, где  $\Delta\varphi_{jk} = (2m + 1)\pi$ .

Основной задачей голографической интерферометрии является определение вектора смещения  $\vec{g}(\vec{\rho}_0) = \vec{g}_0(x_0, y_0)$  по поверхности объекта по системе интерференционных полос, наблюдаемых на восстановленном голографическом изображении объекта. В общем случае, когда априори не известно направление смещения  $\vec{g}$  и положение несмещенных точек, где  $\vec{g} = 0$ , то решение этой обратной задачи невозможно однозначно. В простых случаях, когда заранее известны некоторые параметры смещения поверхности, эта задача решается однозначно. Например, при наклоне (повороте) объекта в известном направлении на малый угол  $\alpha$  вокруг оси, лежащей на поверхности объекта (рис. 3,а).

Если поверхность объекта перпендикулярна оси  $z$ , совпадающей с направлением на центр ПЗС-матрицы, то вектор смещения  $\vec{g}$  можно считать также приблизительно параллельным этой оси. При угле падения  $\gamma$  освещающего пучка на поверхность объекта для разности фаз  $\Delta\varphi_{jk}(x_0)$  согласно (5) получим:

$$\Delta\varphi_{jk}(x_0) = \frac{2\pi}{\lambda} g(x_0)(1 + \cos\gamma) = \frac{2\pi}{\lambda} x_0 \cdot \alpha(1 + \cos\gamma), \quad (6)$$

где полагается, что ось поворота параллельна оси  $y_0$  и проходит через начало координат  $x_0$ . Уравнение (6) позволяет по периоду полос  $\Lambda$  определить угол поворота  $\alpha$  поверхности объекта.

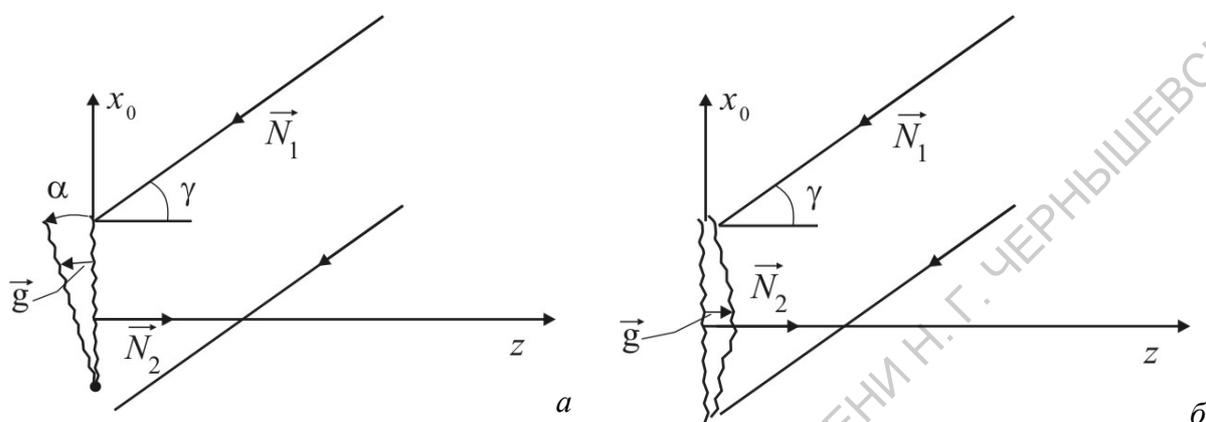


Рис. 3. К расчету разности фаз  $\Delta\varphi_{jk}(x_0)$  при повороте объекта на малый угол  $\alpha$  (а) и при деформации изгиба (б)

Также просто решается задача определения смещений поверхности  $\vec{g}(x_0, y_0)$  при изгибе мембраны, жестко закрепленной по контуру, под действием сосредоточенной или распределенной силы (см. интерферограммы на рис. 1) или при консольном изгибе поверхности. На рис. 3,б показана схема для расчета разности фаз объектных полей  $\Delta\varphi(x_0, y_0)$ , возникающей при изгибе мембраны.

### Влияние спекл-модуляции восстановленного изображения

Если объект имеет рассеивающую поверхность, то отраженное от него когерентное оптическое поле приобретает случайную пространственную амплитудно-фазовую модуляцию. Комплексная амплитуда этого поля  $U_s(\vec{\rho}, z)$  становится случайной функцией пространственных координат

$$U_s(\vec{\rho}, z) = A_s(\vec{\rho}, z) \exp[i\Phi_s(\vec{\rho}, z)], \quad (7)$$

где амплитуда  $A_s(\vec{\rho}, z)$  и фаза  $\Phi_s(\vec{\rho}, z)$  – случайные пространственные функции.

Интенсивность этого поля  $I_s(\vec{\rho}, z) = |U_s(\vec{\rho}, z)|^2 = A_s^2(\vec{\rho}, z)$  также случайная пространственная функция. Визуально, случайное распределение интенсивности  $I_s(\vec{\rho}, z)$  воспринимается в виде системы светлых и темных пятен – спеклов (рис. 4,а). При наложении на это спекл-модулированное поле когерентной опорной волны возникает интерференционная картина в виде системы полос, наблюдаемых в пределах отдельных спеклов (рис. 4,б).

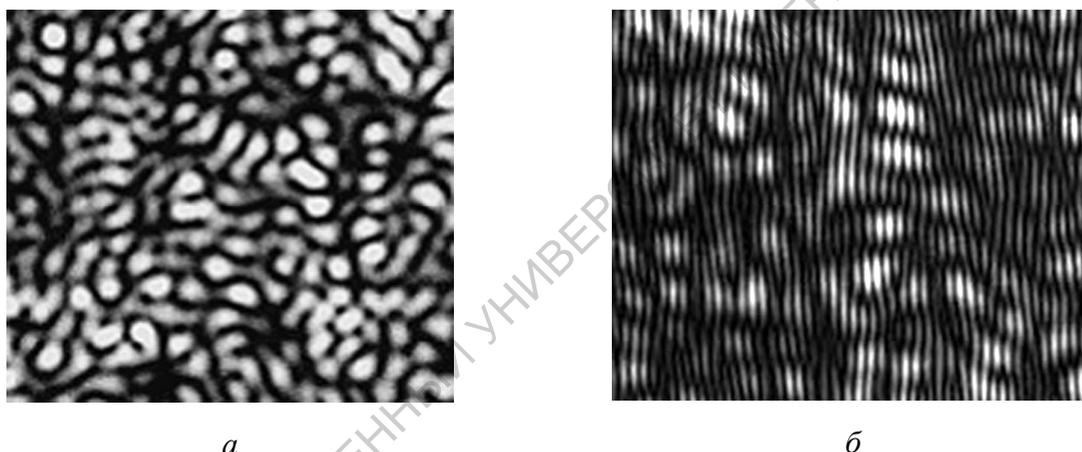


Рис. 4. Спекл-картина в поперечном сечении поля рассеянного лазерного пучка (а) и при наложении на это поле когерентной опорной волны (б)

Поперечные размеры спеклов определяются величиной угловой апертуры рассеяния поля:

$$\varepsilon_{\perp} \approx \frac{\lambda}{2\theta_s}, \quad (8)$$

где  $2\theta_s \approx D/z$ ,  $D$  – поперечный размер рассеивающего объекта,  $z$  – расстояние от объекта до плоскости наблюдения (плоскости записи).

Продольные размеры спеклов  $\varepsilon_{\parallel}$  существенно больше поперечных, особенно при малой угловой апертуре поля  $2\theta_s$ :

$$\varepsilon_{//} \approx \frac{2\lambda^2}{\theta_s^2}. \quad (9)$$

Период интерференционных полос  $\Lambda_H$  внутри спеклов определяется углом падения опорного пучка  $\theta$

$$\Lambda_H = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}. \quad (10)$$

В цифровой голографии на ПЗС-матрице записывается небольшой фрагмент  $P(\vec{\rho})$  рассеянного поля  $U(\vec{\rho}, z)$ . Необходимо, чтобы спеклы этого поля и интерференционные полосы внутри них разрешались пиксельными элементами матрицы – межпиксельное расстояние должно быть по крайней мере в несколько раз меньше поперечных размеров спеклов  $\varepsilon_{\perp}$ .

В пределах спеклов комплексная амплитуда поля имеет детерминированное значение, а при переходе от спекла к спеклу меняется случайным образом. Отдельный спекл можно рассматривать в качестве области корреляции рассеянного поля.

Поскольку на голограмме записывается спекл-модулированное поле, то восстанавливается также спекл-модулированное поле с комплексной амплитудой  $U_s(\vec{\rho})$  случайного характера. Фурье-преобразование этой случайной функции приводит также к случайной функции – случайной комплексной амплитуде поля в плоскости  $\vec{\rho}_0(x_0, y_0)$  изображения объекта

$$U(\vec{\rho}_0) = A(\vec{\rho}_0) \exp[i\Phi(\vec{\rho}_0)], \quad (11)$$

где  $A(\vec{\rho}_0)$  – случайное распределение амплитуды,  $\Phi(\vec{\rho}_0)$  – случайное распределение фазы, среднее значение которой  $\varphi(\vec{\rho}_0) = \langle \Phi(\vec{\rho}_0) \rangle$  определяет детерминированное фазовое распределение, которое изменяется при смещении или изменении формы поверхности объекта,  $\Phi(\vec{\rho}_0) = \psi(\vec{\rho}_0) + \varphi(\vec{\rho}_0)$ , где  $\psi(\vec{\rho}_0)$  – чисто случайная составляющая фазы.

Следовательно, восстановленное изображение объекта  $I(\vec{\rho}_0)$  будет содержать спекл-структуру: функция  $I(\vec{\rho}_0)$  – случайная функция, (см., например, рис. 1,б).

Размеры спеклов в изображении, восстановленном с цифровой голограммы, определяются размерами ПЗС-матрицы. В соответствии с алгоритмом быстрого фурье-преобразования спеклы изображения будут совпадать по размеру с пикселями изображения – 1 спекл  $\approx$  1 пиксель.

Спекл-модуляция изображения влияет на вид интерференционной картины, формируемой в методе цифровой голографической интерферометрии. Если период полос окажется приблизительно равным размеру спекла, то такие полосы будут практически не разрешимы. Кроме того, если объект между последовательными записями голограммы смещается на величину, превышающую размер спекла в изображении, то возникает эффект декорреляции комплексных амплитуд полей  $U_j(\vec{\rho}_0)$  и  $U_k(\vec{\rho}_0)$ , соответствующих этим положениям объекта.

Для распределения интенсивности  $I_{jk}(\vec{\rho}_0)$  в суммарном изображении аналогично уравнению (2) получаем:

$$\begin{aligned} I_{jk}(\vec{\rho}_0) &= |U_j(\vec{\rho}_0) + U_k(\vec{\rho}_0 - \vec{g})|^2 = \\ &= I_j(\vec{\rho}_0) + I_k(\vec{\rho}_0 - \vec{g}) + 2A_j(\vec{\rho}_0)A_k(\vec{\rho}_0 - \vec{g}) \times \\ &\times \cos[\psi(\vec{\rho}_0) - \psi(\vec{\rho}_0 - \vec{g}) + \varphi_j(\vec{\rho}_0) - \varphi_k(\vec{\rho}_0, \vec{g})], \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\vec{g}$  – вектор смещения точек поверхности объекта.

В (12) предполагается, что в результате смещения  $\vec{g}$  спекл-структура также смещается, но не претерпевает каких-либо других изменений. В зависимости фазы  $\varphi_k(\vec{\rho}_0, \vec{g})$  от  $\vec{g}$  отражено изменение среднего фазового распределения поля  $\langle \Phi(\vec{\rho}_0) \rangle = \varphi(\vec{\rho}_0)$  от величины смещения.

Если величина  $\vec{g}$  превышает размер спеклов, то  $\psi(\vec{\rho}_0) \neq \psi(\vec{\rho}_0 - \vec{g})$  и в (12) под знаком косинуса оказывается случайная разность фаз  $\Delta\psi(\vec{\rho}_0) = \psi(\vec{\rho}_0) - \psi(\vec{\rho}_0 - \vec{g})$ , которая разрушает детерминированное изменение косинуса и, следовательно, приводит к случайной зависимости третьего слагаемого в (12) от координат.

Это приводит к разрушению регулярной интерференционной картины в зависимости от фазового сдвига  $\Delta\varphi_{jk}(\vec{\rho}_0, \vec{g})$ . В наибольшей степени на эффект разрушения интерференционной картины влияют поперечные смещения поверхности, когда  $\vec{g}$  перпендикулярен оси  $z$ . В этом случае средняя разность фаз  $\Delta\varphi_{jk}$  слабо зависит от  $\vec{g}$ , что следует из уравнения (4), а эффект декорреляции, наоборот, сильно зависит от  $\vec{g}$ , поскольку в поперечном направлении спеклы имеют наименьший размер.

В продольном направлении спеклы имеют больший размер, поэтому нормальное смещение  $\vec{g}$  точек поверхности – вдоль оси  $z$ , практически не приводит к эффектам декорреляции спекл-структур – спекл-структуры обоих изображений совпадают. Поэтому в уравнении (12) можем положить  $\psi(\vec{\rho}_0) \approx \psi(\vec{\rho}_0 - \vec{g})$  и под знаком косинуса случайные фазовые сдвиги вычитаются и остается только детерминированная разность фаз  $\Delta\varphi_{jk}(\vec{\rho}_0, \vec{g})$ .

В этом случае уравнение (12) можно переписать в виде:

$$I_{jk}(\vec{\rho}_0) \approx 2I_j(\vec{\rho}_0) \left[ 1 + \cos(\Delta\varphi_{jk}(\vec{\rho}_0, \vec{g})) \right], \quad (13)$$

которое показывает, что спекл-структура отдельного изображения объекта  $I_j(\vec{\rho}_0)$  промодулирована осциллирующей функцией  $2 \left[ 1 + \cos(\Delta\varphi_{jk}(\vec{\rho}_0, \vec{g})) \right]$ , которая определяет картину интерференционных полос на фоне спекл-модулированного изображения.

Из (13) следует, что если средний период изменения функции  $I_j(\vec{\rho}_0)$ , определяющий размер спекла, равен периоду модулирующей функции – периоду интерференционных полос  $\Lambda$ , то полосы перестают проявляться в изображении.

Фактически, в этом эффекте заложено ограничение на диапазон измеряемых величин  $\vec{g}$ , вернее, на величины изменения  $\vec{g}$  по поверхности объекта,  $\partial g/\partial x_0$  и  $\partial g/\partial y_0$ .

### **Оптические схемы записи цифровых голограмм в методе голографической интерферометрии**

Для реализации метода цифровой голографической интерферометрии могут быть использованы схемы записи голограмм в дифракционном поле – ближней или дальней областях дифракции, а также схема записи голограммы сфокусированного изображения. Поскольку на этапе восстановления предпочтительнее использовать быстрое преобразование Фурье, то и схема записи голограммы в дифракционном поле должна обеспечивать аналоговое оптическое преобразование Фурье. На рис. 5 представлены две схемы записи фурье-голограмм с различными способами формирования опорного пучка света.

На рис. 6 приведены схемы записи цифровой голограммы сфокусированного изображения с амплитудным делением лазерного пучка на опорный и объектный. В схеме на рис. 6,а в опорном канале используется длиннофокусная линза  $L3$  и плоское зеркало  $M2$ , тогда как в схеме на рис. 6,б вместо этих оптических элементов используется сферическое зеркало  $SM$ .

В схеме записи голограммы сфокусированного изображения можно использовать и схему с делением расширенного лазерного пучка по волновому фронту, аналогичной схеме, приведенной на рис. 5,б.

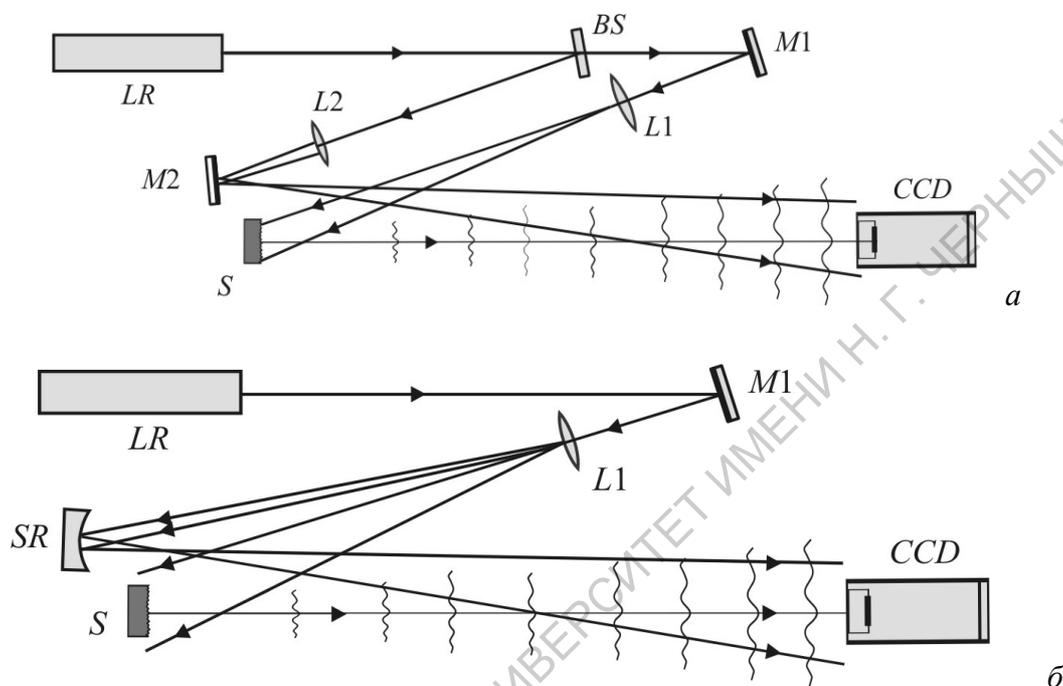


Рис. 5. Оптические схемы записи цифровых голограмм с формированием опорного пучка делением по амплитуде лазерного пучка (а) и делением расширенного лазерного пучка по волновому фронту (б): *LR* – лазер; *BS* – делитель; *M1* и *M2* – зеркала; *L1* и *L2* – собирающие линзы; *SM* – сферическое зеркало; *CCD* – ПЗС-камера; *S* – объект

При записи цифровой голограммы сфокусированного изображения отсутствует необходимость численного дифракционного преобразования голограммы для восстановления комплексной амплитуды изображения поверхности объекта, поскольку это изображение на этапе записи голограммы совпадает с плоскостью ПЗС-матрицы.

Особенности записи цифровых голограмм сфокусированных изображений обусловлены необходимостью разрешения спекл-структуры изображения объекта и голограммной интерференционной структуры, образованной опорной и предметной волнами.

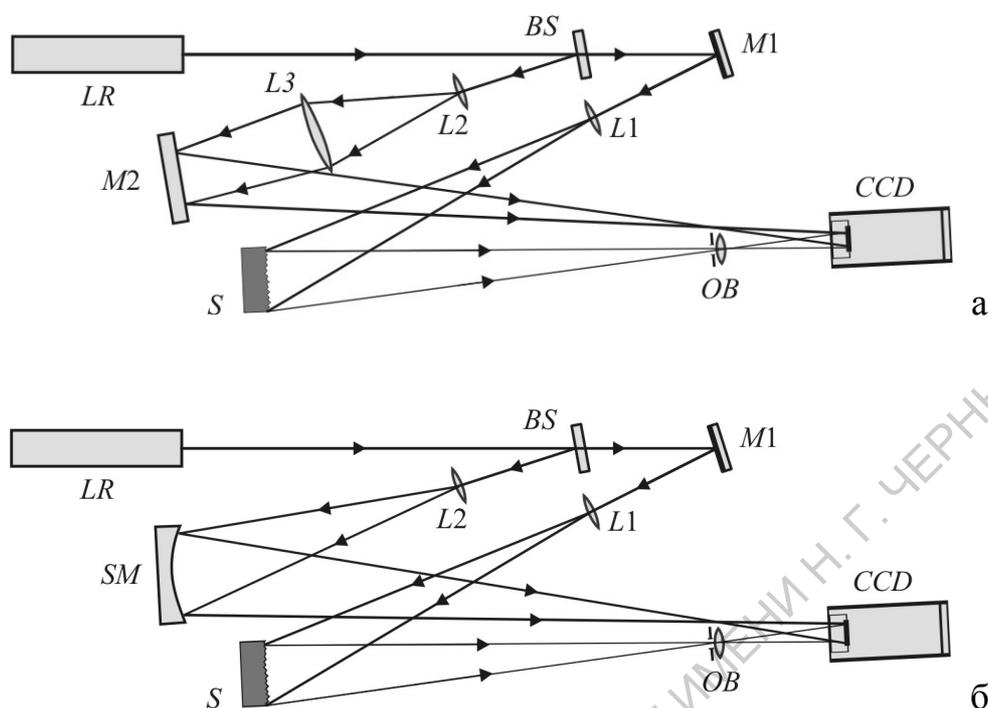


Рис. 6. Схемы записи цифровой голограммы сфокусированного изображения: *LR* – лазер; *BS* – делитель; *M1* и *M2* – плоские зеркала; *L1*, *L2*, *L3* – собирающие линзы; *SM* – сферическое зеркало; *OB* – объектив; *CCD* – ПЗС-камера; *S* – объект

Размеры спеклов в пространстве изображений определяются угловой апертурой  $2\theta'_s$  выходного пучка изображающей системы (объектива) *L3*,  $\varepsilon_{\perp} \approx \lambda/2\theta'_s$ . Следовательно, необходимо использовать малую апертурную диафрагму  $D_a$  объектива, формирующего изображение рассеивающего объекта на ПЗС-матрице:  $2\theta'_s \approx D_a/z'$ ,  $\varepsilon_{\perp} \approx \lambda z'/D_a$ , где  $z'$  - расстояние от выходного зрачка объектива до изображения. При требовании  $\varepsilon_{\perp} \geq 2\Delta l'$ , где  $\Delta l'$  – межпиксельное расстояние ПЗС-матрицы, получаем  $\lambda z'/D_a \geq 2\Delta l' \rightarrow D_a \leq \lambda z'/2\Delta l'$  при заданном коэффициенте уменьшения изображения  $\beta = z'/z$  ( $z$  - расстояние от объекта до объектива).

Необходимость малого угла падения  $\theta$  опорного пучка на голограмму ограничивает возможные поперечные размеры объектива. В качестве объектива целесообразно использовать малоапертурную линзу-объектив

без оправы, исправленную от сферических aberrаций, с фокусным расстоянием  $f$ , обеспечивающим необходимый коэффициент уменьшения изображения  $\beta$ , достаточный для фокусировки всего изображения объекта в апертуру ПЗС-камеры.

Еще одна особенность записи голограммы сфокусированного изображения связана с формированием в плоскости изображения объектного поля с детерминированным фазовым распределением  $\varphi(\vec{\rho}_0) = \frac{\pi}{\lambda z'} \vec{\rho}_0^2$ , обусловленным влиянием фокусирующих свойств объектива. Для компенсации влияния этого фазового распределения с целью формирования голографической интерференционной структуры с минимально возможной пространственной частотой опорная волна должна иметь приблизительно такое же фазовое распределение. Для этого достаточно сфокусировать опорную волну в плоскость зрачка линзы-объектива L3, формирующей изображение объекта на ПЗС-камере, как это показано на рис. 6.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Цели экспериментальной работы: в натурном эксперименте изучить физические принципы и технические особенности реализации метода цифровой голографической интерферометрии, изучить принципы компьютерной обработки численных голограмм объектов в различных состояниях для восстановления голографического изображения объекта – интерферограммы, отражающей в количественной форме изменения пространственного положения поверхности объекта.

Приборы и принадлежности: виброзащитный стенд для голографических и интерференционных исследований, *He-Ne* лазер, делитель пучка, микрообъективы и линзы для расширения лазерного пучка, светофильтры, поляризатор, плоские и сферические металлизированные зеркала, прецизионные механические устройства для крепления и юстировки оптических элементов в голографической схеме, объекты со специальными устройствами для пространственного смещения или изменения формы (деформации) объекта для записи их голографических изображений и формирования голографических изображений-интерферограмм, ПЗС-камера, компьютер.

**Задание 1. Разработка оптической схемы записи цифровых фурье-голограмм для реализации метода цифровой голографической интерферометрии и расчет параметров схемы**

Порядок выполнения задания:

1. Изучить по описанию к ПЗС-камере ее характеристики и параметры, условия эксплуатации, программные возможности, программный интерфейс.
2. Рассчитать максимально возможный угол падения опорного пучка на ПЗС-матрицу, принимая во внимание величину межпиксельного расстояния матрицы.
3. Определить максимально возможный угловой размер объекта для записи его фурье-голограммы и возможное его положение относительно плоскости записи ПЗС-матрицы.
4. Спроектировать схему записи цифровой фурье-голограммы, ориентируясь на схемы, приведенные на рис. 5, исходя из возможности разрешения ПЗС-матрицей голограммной структуры – картины интерференции объектной и опорной волн, и с учетом возможного расположения оптических элементов схемы на рабочей поверхности виброзащитного стенда.
5. Согласовать эскиз спроектированной схемы с преподавателем.
6. Собрать схему записи цифровой фурье-голограммы рассеивающего объекта.

**Задание 2. Запись серии цифровых фурье-голограмм объекта, соответствующих различным пространственным положениям поверхности объекта, и численное восстановление голографических изображений-интерферограмм**

Порядок выполнения задания:

1. Проверить соединение ПЗС-камеры с компьютером через специальный кабель.
2. Включить компьютер и запустить специализированную программу записи кадров цифровых изображений с ПЗС-камеры.
3. Используя интерфейс программы ПЗС-камеры, установленной в схеме записи цифровой голограммы, произвести настройку режима записи голограммы при засветке матрицы камеры одновременно объектным и опорным полями.
4. Записать серию кадров цифровых голограмм объектного поля, соответствующих различным пространственным положениям объекта - при деформации его поверхности под действием сосредоточенной силы (деформация прогибы мембраны) или при повороте объекта вокруг оси, лежащей в плоскости его поверхности. Для создания деформации или поворота использовать специальные устройства.

Голограммы записать в форме графического файла на жесткий диск компьютера в директорию (папку), выделенную преподавателем для выполнения данной лабораторной работы.

5. Используя специализированную компьютерную программу обработки цифровых изображений, основанную на алгоритме быстрого преобразо-

вания Фурье, произвести численную обработку файлов цифровых голограмм и восстановить голографические изображения-интерферограммы, отражающие пространственные изменения объекта.

6. Записать программно восстановленные изображения-интерферограммы объекта в отдельные файлы в графическом формате.
7. Используя формулу (5), произвести обработку изображений-интерферограмм с целью определения величины смещения объекта  $\vec{g}(\vec{\rho}_0) = \vec{g}_0(x_0, y_0)$  между двумя кадрами записанных голограмм. Построить график зависимости величины смещения  $|\vec{g}_0(x_0, y_0)|$  от координаты  $x_0$  или  $y_0$ .

**Задание 3. Запись серии цифровых голограмм сфокусированного изображения объекта, соответствующих различным пространственным положениям объекта, и численное восстановление голографических изображений-интерферограмм**

Порядок выполнения задания:

Следуя пунктам выполнения задания 2 экспериментально реализовать метод цифровой голографической интерферометрии сфокусированного изображения объекта при деформации его поверхности под действием сосредоточенной силы (деформация прогибы мембраны) или при повороте объекта вокруг оси, лежащей в плоскости его поверхности.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Дать определение методу оптической голографической интерферометрии.
2. В чем состоит принципиальное отличие методов аналоговой и цифровой голографической интерферометрии?
3. Нарисовать схему записи цифровых фурье-голограмм и проанализировать алгоритмы восстановления цифровых изображений-интерферограмм.
4. Записать уравнение для распределения интенсивности в восстановленном голографическом изображении-интерферограмме.
5. Каким образом спекл-эффект влияет на параметры разрешения восстановленного изображения-интерферограммы?
6. Какими параметрами схемы записи и ПЗС-матрицы ограничивается пространственное разрешение изображения, восстановленного с цифровой фурье-голограммы?
7. Записать уравнение для разности фаз объектных полей, соответствующих различным пространственным положениям поверхности объекта.
8. Записать уравнение для расчета величины смещения точек поверхности по параметрам голографического изображения-интерферограммы.

САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Локшин Г.Р. Основы радиооптики. – М.: Интеллект, 2009. - 344 с.
2. Голубенцева Л.И., Рябухо В.П., Перепелицына О.А. Специальный оптический практикум: Оптическая голография: Учебное пособие. Под ред. В.П.Рябухо. – Саратов, 2009. – 117 с.  
[http://library.sgu.ru/uch\\_lit/3.pdf](http://library.sgu.ru/uch_lit/3.pdf)
3. Голубенцева Л.И., Рябухо В.П., Перепелицына О.А. Специальный оптический практикум: Голографическая и спекл-интерферометрия: Учебное пособие. Под ред. В.П.Рябухо. – Саратов, 2009. – 69 с.  
[http://library.sgu.ru/uch\\_lit/2.pdf](http://library.sgu.ru/uch_lit/2.pdf)
4. Андреева О.В. Прикладная голография. Учебное пособие. – Спб.: СпбГУИТМО, 2008. – 184 с.  
<http://books.ifmo.ru/file/pdf/431.pdf>

## СПИСОК ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балтийский С.А., Гуров И.П., Де Никола С., Коппола Д., Ферраро П. Современные методы цифровой голографии. – В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики /Под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 91-117.
2. Schnars U., Jueptner W. Digital holography. Digital hologram recording, numerical reconstruction and related techniques. – Springer Verlag, 2004. – 164 p.
3. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. / Пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – 688 с.

- 
4. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. / Пер. с англ. – М.: Мир, 1970. – 364 с.
  5. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 328с.
  6. Рябухо В.П. Спекл-интерферометрия. Соросовский образовательный журнал. – 2001. – Т. 7. – № 5. – С. 102-109.