

## Формирование спекл-интерференционных картин, характеризующих поперечное или продольное перемещение диффузно рассеивающей свет поверхности при использовании телескопической оптической системы Галилея

В.Г. Гусев\*

Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 6.11.2008 г.

Анализируется чувствительность спекл-интерферометра к поперечным или продольным перемещениям диффузно рассеивающей свет плоской поверхности, когда на стадии двухэкспозиционной записи спеклограммы используется телескопическая оптическая система Галилея. Показано, что чувствительность интерферометра к поперечному перемещению зависит от величины и знака радиуса кривизны сферической волны когерентного излучения, освещающего поверхность. Чувствительность интерферометра к продольному перемещению зависит от масштаба Фурье-образа функции, характеризующей комплексную амплитуду отражения или пропускания рассеивателя. Экспериментальные результаты соответствуют теоретическим предположениям.

*Ключевые слова:* дифракция, интерференция, спекл, спеклограмма, пространственный фильтр.

В [1] показано, что при использовании на стадии двухэкспозиционной записи голограммы зрительной трубы Галилея механизм образования интерференционных картин, характеризующих поперечное перемещение диффузно рассеивающей свет плоской поверхности, связан, с одной стороны, с углом наклона в плоскости голограммы субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции, с другой — с однородным смещением в плоскости голограммы составляющей субъективного спекла, обусловленной дифракцией плоской волны на зрачке объектива (или окуляра) зрительной трубы. При этом чувствительность интерферометра в случае регистрации интерференционной картины, локализуемой в плоскости формирования изображения рассеивателя из-за смещения спеклов второй экспозиции, зависит как от величины, так и от знака радиуса кривизны фронта сферической волны когерентного излучения, используемого для освещения рассеивателя.

В свою очередь, механизм образования в диффузно рассеянных полях интерференционных картин, характеризующих продольное перемещение диффузно рассеивающей свет плоской поверхности, связан с изменением (по радиусу от оптической оси) угла наклона в плоскости голограммы субъектив-

ных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции. При этом чувствительность интерферометра в случае регистрации интерференционной картины, локализуемой в плоскости формирования изображения рассеивателя, зависит от величины радиуса кривизны фронта сферической волны когерентного излучения, используемого для освещения рассеивателя, и не зависит от его знака.

В настоящей статье анализируются особенности образования при использовании зрительной трубы Галилея спекл-интерференционных картин, характеризующих поперечное или продольное перемещение диффузно рассеивающей свет плоской поверхности, с целью определения чувствительности интерферометра.

Согласно рис. 1 матовый экран 1, находящийся в плоскости  $(x_1, y_1)$ , освещается когерентным излучением с расходящейся сферической волной радиусом кривизны  $R$ . Диффузно рассеянное им излучение после прохождения телескопической оптической системы Галилея (положительная тонкая линза  $L_1$  с фокусным расстоянием  $f_1$  — объектив, отрицательная тонкая линза  $L_2$  с фокусным расстоянием  $f_2$  — окуляр) регистрируется на фотопластинке 2, находящейся в плоскости  $(x_4, y_4)$ , за время первой экспозиции. Перед повторным экспонированием осуществляется перемещение матового экрана в плоскости его расположения, например в направлении оси  $x$  на величину  $a$ .

\* Владимир Георгиевич Гусев (gusov@mail.tomsknet.ru).

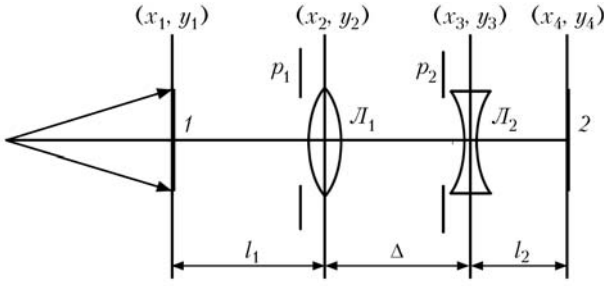


Рис. 1. Схема двухэкспозиционной записи спеклограммы: 1 – матовый экран; 2 – фотопластинка;  $L_1$  – положительная линза;  $L_2$  – отрицательная линза;  $p_1, p_2$  – апертурные диафрагмы

В приближении Френеля при условии пространственной ограниченности поля зрительной трубой распределение в плоскости фотопластинки его комплексных амплитуд, соответствующих первой и второй экспозиции, на основании [1] имеет вид

$$u_1(x_4, y_4) \sim \exp\left[\frac{ik}{2l}(x_4^2 + y_4^2)\right] \times \left\{ F(x_4, y_4) \otimes \exp\left[-\frac{ikR}{2l(R + \mu^2 l)}(x_4^2 + y_4^2)\right] \otimes P_1(x_4, y_4) \otimes P_2(x_4, y_4) \right\}, \quad (1)$$

$$u_2(x_4, y_4) \sim \exp\left[-\frac{ik(R + \mu^2 l)a^2}{2\mu^2 R l}\right] \exp\left(\frac{ikax_4}{\mu l}\right) \times \exp\left[\frac{ik}{2l}(x_4^2 + y_4^2)\right] \left\{ F(x_4, y_4) \otimes \exp\left[-\frac{ikR}{2l(R + \mu^2 l)}(x_4^2 + y_4^2)\right] \otimes \exp\left(-\frac{ikax_4}{\mu l}\right) \left\{ P_1\left[x_4 + \frac{(R + \mu^2 l)a}{\mu R}, y_4\right] \otimes P_2(x_4, y_4) \right\} \right\}, \quad (2)$$

где  $\otimes$  – символ операции свертки;  $k$  – волновое число;  $l = l_2 + \Delta/\mu + l_1/\mu^2$  – радиус кривизны расходящейся сферической волны;  $\mu = f_1/f_2$  – увеличение зрительной трубы;  $\Delta = f_1 - f_2$  – длина зрительной трубы;  $l_1$  – расстояние между плоскостями  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $l_2$  – расстояние между плоскостями  $(x_3, y_3)$ ,  $(x_4, y_4)$ ;  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$ , – главные плоскости линз  $L_1, L_2$ ;  $F(x_4, y_4)$  – Фурье-образ функции  $t(x_1, y_1)$  с пространственными частотами  $x_4/\lambda\mu l$ ,  $y_4/\lambda\mu l$ ,  $\lambda$  – длина волны когерентного источника света, используемого на стадиях записи и воспроизведения спеклограммы;  $t(x_1, y_1)$  – комплексная амплитуда пропускания матового экрана, являющаяся случайной функцией координат;  $P_1(x_4, y_4)$  – Фурье-образ функции  $p_1(x_2, y_2)$  [2] зрачка объектива зрительной трубы с пространственными частотами  $x_4/\lambda(\Delta + \mu l_2)$ ,  $y_4/\lambda(\Delta + \mu l_2)$ ,  $P_2(x_4, y_4)$  – Фурье-образ функции  $p_2(x_3, y_3)$  зрачка окуляра зрительной трубы с пространственными частотами  $x_4/\lambda l_2$ ,  $y_4/\lambda l_2$ .

Из (1), (2) следует, что в общем случае в плоскости  $(x_4, y_4)$  формируется квази-Фурье-образ функции  $t(x_1, y_1)$ , каждая точка которого уширена до размера субъективного спекла, определяемого шириной функции  $P_1(x_4, y_4) \otimes P_2(x_4, y_4)$ , и на субъективное спекл-поле наложено распределение фазы расходящейся сферической волны с радиусом кривизны, равным  $l$ . При этом для второй экспозиции имеет место смещение составляющей субъективного поля, обусловленной дифракцией плоской волны на зрачке объектива зрительной трубы, на величину  $(R + \mu^2 l)a/\mu R$ . В частном случае, когда матовый экран 1 (см. рис. 1) освещается излучением со сходящейся сферической волной с радиусом кривизны, равным  $\mu l$ , в плоскости фотопластинки формируется Фурье-образ функции  $t(x_1, y_1)$  и отсутствует смещение вышеуказанной составляющей субъективного спекла.

При условии выполнения двухэкспозиционной записи спеклограммы на линейном участке кривой почернения фотоматериала распределение комплексной амплитуды ее пропускания без учета постоянной составляющей, так как она будет занимать малую область пространства в плоскости регистрации спекл-интерферограммы, на основании (1), (2) определяется выражением

$$\tau(x_4, y_4) \sim \left\{ F(x_4, y_4) \otimes \exp\left[-\frac{ikR}{2l(R + \mu^2 l)}(x_4^2 + y_4^2)\right] \otimes P_1(x_4, y_4) \otimes P_2(x_4, y_4) \right\} \{к.с.\} + \left\{ F(x_4, y_4) \otimes \exp\left[-\frac{ikR}{2l(R + \mu^2 l)}(x_4^2 + y_4^2)\right] \otimes \exp\left(-\frac{ikax_4}{\mu l}\right) P_1\left[x_4 + \frac{(R + \mu^2 l)a}{\mu R}, y_4\right] \otimes \exp\left(-\frac{ikax_4}{\mu l}\right) P_2(x_4, y_4) \right\} \{к.с.\} \quad (3)$$

(к.с. обозначает комплексно-сопряженную величину).

Положим, что на стадии воспроизведения двухэкспозиционной спеклограммы согласно рис. 2 в общем случае в ее плоскости вне оптической оси проводится пространственная фильтрация дифракционного поля с помощью непрозрачного экрана  $p_0$  с круглым отверстием.

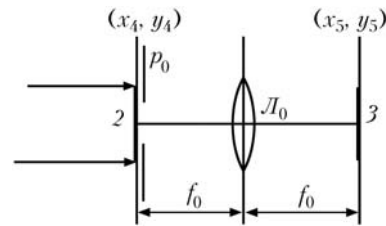


Рис. 2. Схема регистрации спекл-интерференционной картины, характеризующей поперечное перемещение рассеивателя: 2 – спеклограмма; 3 – плоскость регистрации интерферограммы;  $L_0$  – положительная линза;  $p_0$  – пространственный фильтр

При этом диаметр фильтрующего отверстия, центр которого имеет координаты  $(x_{04}, 0)$ , много больше размера субъективного спекла в плоскости спеклограммы. Тогда распределение комплексной амплитуды поля на выходе пространственного фильтра принимает вид

$$\begin{aligned}
& u(x_4, y_4) \sim p_0(x_4, y_4) \times \\
& \times \left\{ \left[ F(x_4 + x_{04}, y_4) \otimes \exp \left\{ -\frac{ikR}{2l(R + \mu^2 l)} [(x_4 + x_{04})^2 + y_4^2] \right\} \right] \otimes \right. \\
& \left. \otimes P_1(x_4, y_4) \otimes P_2(x_4, y_4) \right\} \{ \text{к.с.} \} + \left\{ F(x_4 + x_{04}, y_4) \otimes \right. \\
& \left. \otimes \exp \left\{ -\frac{ikR}{2l(R + \mu^2 l)} [(x_4 + x_{04})^2 + y_4^2] \right\} \otimes \exp \left( -\frac{ikax_4}{\mu l} \right) \times \right. \\
& \left. \times P_1 \left[ x_4 + \frac{(R + \mu^2 l)a}{\mu R}, y_4 \right] \otimes \exp \left( -\frac{ikax_4}{\mu l} \right) P_2(x_4, y_4) \right\} \{ \text{к.с.} \}.
\end{aligned} \quad (4)$$

На основании, например, [3] распределение комплексной амплитуды поля в задней фокальной плоскости  $(x_5, y_5)$  положительной линзы  $L_0$  (см. рис. 2) с фокусным расстоянием  $f_0$  соответствует Фурье-образу входной функции, т.е. с учетом четности функций  $p_1(x_2, y_2)$ ,  $p_2(x_3, y_4)$  получим

$$\begin{aligned}
& u(x_5, y_5) \sim \left\{ p_1 \left( \frac{\Delta + \mu l_2}{f_0} x_5, \frac{\Delta + \mu l_2}{f_0} y_5 \right) p_2 \left( \frac{l_2}{f_0} x_5, \frac{l_2}{f_0} y_5 \right) \times \right. \\
& \times t \left( -\frac{\mu l}{f_0} x_5, -\frac{\mu l}{f_0} y_5 \right) \exp \left[ \frac{ikl(R + \mu^2 l)}{2Rf_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \\
& \times \exp \left( \frac{i2kx_{04}x_5}{f_0} \right) \otimes p_1 \left( \frac{\Delta + \mu l_2}{f_0} x_5, \frac{\Delta + \mu l_2}{f_0} y_5 \right) \times \\
& \times p_2 \left( \frac{l_2}{f_0} x_5, \frac{l_2}{f_0} y_5 \right) t^* \left( \frac{\mu l}{f_0} x_5, \frac{\mu l}{f_0} y_5 \right) \times \\
& \times \exp \left[ -\frac{ikl(R + \mu^2 l)}{2Rf_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \exp \left( \frac{i2kx_{04}x_5}{f_0} \right) + \\
& + p_1 \left( \frac{\Delta + \mu l_2}{f_0} x_5 + \frac{\Delta + \mu l_2}{\mu l} a, \frac{\Delta + \mu l_2}{f_0} y_5 \right) \times \\
& \times p_2 \left( \frac{l_2}{f_0} x_5 + \frac{l_2}{\mu l} a, \frac{l_2}{f_0} y_5 \right) t \left( -\frac{\mu l}{f_0} x_5, -\frac{\mu l}{f_0} y_5 \right) \times \\
& \times \exp \left[ \frac{ikl(R + \mu^2 l)}{2Rf_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \exp \left( \frac{i2kx_{04}x_5}{f_0} \right) \times \\
& \times \exp \left[ \frac{ik(R + \mu^2 l)}{\mu R f_0} ax_5 \right] \otimes p_1 \left( \frac{\Delta + \mu l_2}{f_0} x_5 - \frac{\Delta + \mu l_2}{\mu l} a, \frac{\Delta + \mu l_2}{f_0} y_5 \right) \times \\
& \times p_2 \left( \frac{l_2}{f_0} x_5 - \frac{l_2}{\mu l} a, \frac{l_2}{f_0} y_5 \right) t^* \left( \frac{\mu l}{f_0} x_5, \frac{\mu l}{f_0} y_5 \right) \times
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \exp \left[ -\frac{ikl(R + \mu^2 l)}{2Rf_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \exp \left( \frac{i2kx_{04}x_5}{f_0} \right) \times \\
& \times \exp \left[ \frac{ik(R + \mu^2 l)}{\mu R f_0} ax_5 \right] \otimes P_0(x_5, y_5),
\end{aligned} \quad (5)$$

где  $P_0(x_5, y_5)$  — Фурье-образ функции  $p_0(x_4, y_4)$  [4] с пространственными частотами  $x_4/\lambda f_0$ ,  $y_4/\lambda f_0$ .

С учетом достаточной малости величин  $(\Delta + \mu l_2)a/\mu l$ ,  $l_2 a/\mu l$ , чтобы можно было считать видность спекл-интерференционной картины близкой к единице [5, 6], тождества [7], позволяющего выносить по определенному правилу линейный фазовый множитель из-под знаков интегралов свертки функций, неравенства  $l_2 < (\Delta + \mu l_2)/\mu$  [1], распределение комплексной амплитуды поля в плоскости  $(x_5, y_5)$  принимает вид

$$\begin{aligned}
& u(x_5, y_5) \sim \left\{ 1 + \exp \left[ \frac{ik(R + \mu^2 l)}{\mu R f_0} ax_5 \right] \right\} \times \\
& \times \left\{ p_1 \left( \frac{\Delta + \mu l_2}{f_0} x_5, \frac{\Delta + \mu l_2}{f_0} y_5 \right) t \left( -\frac{\mu l}{f_0} x_5, -\frac{\mu l}{f_0} y_5 \right) \times \right. \\
& \times \exp \left[ \frac{ikl(R + \mu^2 l)}{2Rf_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \exp \left( \frac{i2kx_{04}x_5}{f_0} \right) \otimes \\
& \otimes p_1 \left( \frac{\Delta + \mu l_2}{f_0} x_5, \frac{\Delta + \mu l_2}{f_0} y_5 \right) t^* \left( \frac{\mu l}{f_0} x_5, \frac{\mu l}{f_0} y_5 \right) \times \\
& \times \exp \left[ -\frac{ikl(R + \mu^2 l)}{2Rf_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \\
& \times \exp \left( \frac{i2kx_{04}x_5}{f_0} \right) \left. \right\} \otimes P_0(x_5, y_5).
\end{aligned} \quad (6)$$

Если в (6) период изменения функции  $1 + \exp[ik(R + \mu^2 l)ax_5/\mu R f_0]$  хотя бы на порядок [8] превосходит ширину функции  $P_0(x_5, y_5)$ , определяющей размер субъективного спекла в плоскости регистрации  $\mathcal{Z}$  (см. рис. 2), то ее можно вынести из-под знака интеграла свертки. Тогда распределение освещенности в плоскости  $(x_5, y_5)$  определяется выражением

$$\begin{aligned}
& I(x_5, y_5) \sim \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{k(R + \mu^2 l)}{\mu R f_0} ax_5 \right] \right\} \times \\
& \times \left| p_1 \left( \frac{\Delta + \mu l_2}{f_0} x_5, \frac{\Delta + \mu l_2}{f_0} y_5 \right) t \left( -\frac{\mu l}{f_0} x_5, -\frac{\mu l}{f_0} y_5 \right) \times \right. \\
& \times \exp \left[ \frac{ikl(R + \mu^2 l)}{2Rf_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \exp \left( \frac{i2kx_{04}x_5}{f_0} \right) \otimes \\
& \otimes p_1 \left( \frac{\Delta + \mu l_2}{f_0} x_5, \frac{\Delta + \mu l_2}{f_0} y_5 \right) t^* \left( \frac{\mu l}{f_0} x_5, \frac{\mu l}{f_0} y_5 \right) \times \\
& \times \exp \left[ -\frac{ikl(R + \mu^2 l)}{2Rf_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \exp \left( \frac{i2kx_{04}x_5}{f_0} \right) \left. \right|^2 \otimes P_0(x_5, y_5).
\end{aligned} \quad (7)$$

Из (7) следует, что в пределах области, определяемой шириной функции

$$p_1\left(\frac{\Delta + \mu l_2}{f_0} x_5, \frac{\Delta + \mu l_2}{f_0} y_5\right) \otimes p_1\left(\frac{\Delta + \mu l_2}{f_0} x_5, \frac{\Delta + \mu l_2}{f_0} y_5\right),$$

субъективная спекл-структура промодулирована интерференционными полосами, которые периодически изменяются на оси  $x$ . Измерение их периода для известных величин  $\lambda, \mu, R, l, f_0$  обеспечивает возможность определения величины поперечного перемещения диффузно рассеивающей свет плоской поверхности. При этом чувствительность спекл-интерферометра зависит как от величины, так и от знака радиуса кривизны сферической волны когерентного излучения, используемого для освещения рассеивателя на стадии записи спеклограммы.

Так, для положительной величины  $R$  период  $\Delta x_5 = \lambda \mu R f_0 / (R + \mu^2 l) a$  интерференционных полос уменьшается с уменьшением  $R$  из-за увеличения смещения в плоскости спеклограммы указанной выше составляющей субъективного спекла, соответствующего второй экспозиции.

В свою очередь, при освещении матового экрана  $1$  (см. рис. 1) излучением со сходящейся сферической волной период интерференционных полос увеличивается с уменьшением  $R$  в интервале  $\mu^2 l \leq R \leq \infty$  вплоть до бесконечности, когда  $R = \mu^2 l$  и в плоскости спеклограммы формируется Фурье-образ функции  $t(x_1, y_1)$ . В этом случае отсутствует смещение спеклов, соответствующих второй экспозиции.

Дальнейшее уменьшение величины  $R$  приводит к увеличению чувствительности спекл-интерферометра из-за возникновения и увеличения смещения в плоскости спеклограммы составляющей субъективного спекла, обусловленной дифракцией плоской волны на зрачке объектива зрительной трубы Галилея.

Из вышеприведенного анализа образования спекл-интерференционной картины следует, что чувствительность спекл-интерферометра к поперечному перемещению диффузно рассеивающей свет плоской поверхности одинакова с чувствительностью голографического интерферометра [1], в котором регистрируется интерференционная картина, локализуемая в плоскости формирования изображения рассеивателя.

Отличие состоит в том, что на стадии воспроизведения спеклограммы не требуется выполнение пространственной фильтрации дифракционного поля, что обеспечивает возможность увеличения верхнего предела для измеряемой величины, с одной стороны. С другой стороны, из-за увеличения в 2 раза пространственной протяженности спекл-интерференционной картины, что следует из выражения (7), уменьшается порог чувствительности в рассматриваемом спекл-интерферометре.

В эксперименте двухэкспозиционные спеклограммы записывались на фотопластинках типа Микрат-ВРЛ с помощью излучения He-Ne-лазера, работающего на длине волны 0,6328 мкм. Методика

экспериментальных исследований заключалась в сравнении результатов записи спеклограмм с использованием зрительной трубы Галилея с параметрами  $f_1 = 250$  мм,  $f_2 = 120$  мм, диаметрами зрачков  $d_1 = 31$  мм,  $d_2 = 15$  мм. При этом для фиксированных величин: поперечного перемещения рассеивателя  $a = (0,025 \pm 0,002)$  мм, расстояний  $l_1 = 200$  мм,  $l_2 = 150$  мм различные значения радиусов кривизны сферического волнового фронта излучения, используемого для освещения рассеивателя, выбирались в пределах  $300 \text{ мм} \leq |R| \leq \infty$ . Кроме того, для обеспечения условия дифракционной ограниченности поля зрительной трубой диаметр освещенной области матового экрана  $1$  (см. рис. 1) составлял 40 мм.

В качестве примера на рис. 3 представлены спекл-интерференционные картины, зарегистрированные в фокальной плоскости объектива с фокусным расстоянием  $f_0 = 50$  мм при воспроизведении спеклограмм коллимированным пучком диаметром 10 мм. Рис. 3, б относится к случаю освещения рассеивателя на стадии двухэкспозиционной записи спеклограммы коллимированным пучком, рис. 3, в — излучением с расходящейся сферической волной с  $R = 500$  мм, рис. 3, г — со сходящейся с  $R = 500$  мм.

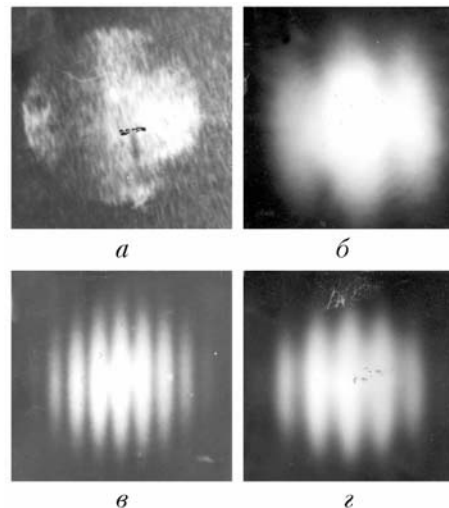


Рис. 3. Голографическая (а) и спекл-интерференционные (б, в, г) картины, характеризующие поперечное перемещение рассеивателя

Для известных величин  $\lambda, a, \mu, l, R, f_0$  рассчитывались периоды интерференционных полос и сравнивались с результатами их измерений. Как в этих трех случаях, так и в других, связанных с изменением как величины  $R$ , так и знака с точностью до ошибки (10%), допускаемой в эксперименте, имеет место их соответствие.

Голографическая интерференционная картина на рис. 3, а локализуется в плоскости формирования изображения матового экрана и характеризует его поперечное перемещение на 25 мкм, когда на стадии записи голограммы рассеиватель освещался коллимированным пучком. Ее пространственная протяженность в фокальной плоскости объектива с фокусным расстоянием 135 мм составляет 9,6 мм, а пе-

риод интерференционной полосы 7,3 мм. Сравнение рис. 3, а и б демонстрирует, с одной стороны, уменьшение порога чувствительности у спекл-интерферометра по сравнению с голографическим интерферометром, с другой – сохранение корреляции субъективных спекл-структур двух экспозиций и в случае частичного перекрытия субъективных спеклов двух экспозиций, когда на стадии записи спеклограммы используется двухкомпонентная оптическая система. Согласно (1), (2) размер  $P_1(x_4, y_4) \otimes P_2(x_4, y_4)$  субъективного спекла в плоскости спеклограммы составляет 17,7 мкм, а величина смещения  $a/\mu$  его составляющей, обусловленной дифракцией плоской волны на зрачке объектива зрительной трубы, равна 12 мкм.

Пусть теперь перед повторным экспонированием фотопластинки 2 (см. рис. 1) матовый экран 1 оказывается смещенным по оси  $z$  на величину  $\Delta l \ll l_1, R$ . Тогда на основании [1] распределение комплексной амплитуды поля, соответствующее второй экспозиции, в плоскости фотопластинки имеет вид

$$u'_2(x_4, y_4) \sim \exp(ik\Delta l) \exp\left[-\frac{ik\Delta l}{2\mu^2 l^2}(x_4^2 + y_4^2)\right] \times \\ \times \exp\left[\frac{ik}{2l}(x_4^2 + y_4^2)\right] \left\{ F'(x_4, y_4) \otimes \right. \\ \left. \otimes \exp\left[-\frac{ik(R - \Delta l)(\mu^2 l + \Delta l)}{2(R + \mu^2 l)\mu^2 l^2}(x_4^2 + y_4^2)\right] \otimes \right. \\ \left. \otimes P_1(x_4, y_4) \otimes P_2(x_4, y_4) \right\}, \quad (8)$$

где  $F'(x_4, y_4)$  – Фурье-образ функции  $t(x_1, y_1)$  с пространственными частотами  $x_4/\lambda\mu l(1 + \Delta l/\mu^2 l)$ ,  $y_4/\lambda\mu l(1 + \Delta l/\mu^2 l)$ .

Экспоненциальный множитель, находящийся под знаком интеграла в (8), характеризует изменение по радиусу от оптической оси угла наклона в плоскости  $(x_4, y_4)$  субъективных спеклов. Причем в голографическом интерферометре [1] он обуславливает, с одной стороны, образование интерференционной картины, локализующейся в плоскости формирования изображения рассеивателя и характеризующей его продольное перемещение, с другой стороны, его наличие при двухэкспозиционной записи спеклограммы приводит к декорреляции спекл-структур двух экспозиций. Поэтому для проведения анализа образования спекл-интерференционной картины, характеризующей продольное перемещение диффузно рассеивающей свет плоской поверхности, будем считать, что матовый экран 1 на рис. 1 освещается излучением с радиусом кривизны, равным  $\mu^2 l$ . Это обеспечивает отсутствие изменения угла наклона [1] субъективных спеклов второй экспозиции. Кроме того, для сокращения записи будем считать знак у  $R$  отрицательным. Тогда при условии выполнения двухэкспозиционной записи спеклограммы на линейном участке кривой почернения фотоматериала распределение комплексной

амплитуды ее пропускания без учета постоянной составляющей на основании (1), (8) определяется выражением

$$\tau'(x_4, y_4) \sim [F(x_4, y_4) \otimes P_1(x_4, y_4) \otimes P_2(x_4, y_4)][\text{к.с.}] + \\ + [F'(x_4, y_4) \otimes P_1(x_4, y_4) \otimes P_2(x_4, y_4)][\text{к.с.}]. \quad (9)$$

Положим, что на стадии воспроизведения двухэкспозиционной спеклограммы, характеризующей продольное перемещение диффузно рассеивающей свет плоской поверхности, рассеянное ею излучение регистрируется в плоскости  $(x_6, y_6)$  с помощью положительной линзы  $L_0$  (рис. 4) с фокусным расстоянием  $f_0$ .

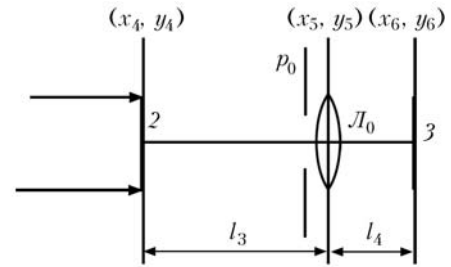


Рис. 4. Схема регистрации спекл-интерференционной картины, характеризующей продольное перемещение рассеивателя: 2 – спеклограмма; 3 – плоскость регистрации интерферограммы;  $L_0$  – положительная линза;  $p_0$  – апертурная диаграмма

Тогда с учетом дифракционной ограниченности поля зрачком этой линзы распределение его комплексной амплитуды в вышеуказанной плоскости в приближении Френеля принимает вид

$$u'(x_6, y_6) \sim \iiint_{-\infty}^{\infty} \tau'(x_4, y_4) \times \\ \times \exp\left\{\frac{ik}{2l_3}[(x_4 - y_5)^2 + (y_4 - y_5)^2]\right\} p_0(x_5, y_5) \times \\ \times \exp\left[-\frac{ik}{2f_0}(x_5^2 + y_5^2)\right] \times \\ \times \exp\left\{\frac{ik}{2l_4}[(x_5 - x_6)^2 + (y_5 - y_6)^2]\right\} dx_4 dy_4 dx_5 dy_5, \quad (10)$$

где  $p_0(x_5, y_5)$  – функция зрачка линзы  $L_0$ ;  $(x_5, y_5)$  – главная плоскость линзы  $L_0$ ;  $l_3, l_4$  – соответственно расстояние между плоскостями  $(x_4, y_4)$ ,  $(x_5, y_5)$  и  $(x_5, y_5)$ ,  $(x_6, y_6)$ .

В результате выполнения известных в Фурье-оптике преобразований получим

$$u'(x_6, y_6) \sim \exp\left[\frac{ik}{2l_4}(x_6^2 + y_6^2)\right] \times \\ \times \left\{ \tau\left(-\frac{l_3}{l_4}x_6, -\frac{l_3}{l_4}y_6\right) \exp\left[\frac{ikl_3}{2l_4^2}(x_6^2 + y_6^2)\right] \otimes \right. \\ \left. \otimes \exp\left[-\frac{ik\mu_0 l_3}{2l_4}(x_6^2 + y_6^2)\right] \otimes P'_0(x_6, y_6) \right\}, \quad (11)$$

где  $\mu_0 = (\tilde{l} + l_3)/l_4$  – коэффициент масштабного преобразования, который следует из условия  $(1/f_0) = 1/(\tilde{l} + l_3) + 1/l_4$ ;  $P'_0(x_6, y_6)$  – Фурье-образ функции  $p_0(x_5, y_5)$  с пространственными частотами  $x_6/\lambda l_4, y_6/\lambda l_4$ .

При подстановке (9) в (11) распределение комплексной амплитуды поля в плоскости  $(x_6, y_6)$  принимает вид

$$u'(x_6, y_6) \sim \exp\left[\frac{ik}{2l_4}(x_6^2 + y_6^2)\right] \left\{ \exp\left[\frac{ikl_3}{2l_4^2}(x_6^2 + y_6^2)\right] \times \right. \\ \times \left[ F\left(-\frac{l_3}{l_4}x_6, -\frac{l_3}{l_4}y_6\right) \otimes P_1\left(-\frac{l_3}{l_4}x_6, -\frac{l_3}{l_4}y_6\right) \otimes \right. \\ \left. \otimes P_2\left(-\frac{l_3}{l_4}x_6, -\frac{l_3}{l_4}y_6\right) \right] [\text{к.с.}] + \\ + \left[ F'\left(-\frac{l_3}{l_4}x_6, -\frac{l_3}{l_4}y_6\right) \otimes P_1\left(-\frac{l_3}{l_4}x_6, -\frac{l_3}{l_4}y_6\right) \otimes \right. \\ \left. \otimes P_2\left(-\frac{l_3}{l_4}x_6, -\frac{l_3}{l_4}y_6\right) \right] [\text{к.с.}] \otimes \\ \left. \otimes \exp\left[-\frac{ik\mu_0 l_3}{2\tilde{l}l_4}(x_6^2 + y_6^2)\right] \otimes P'_0(x_6, y_6) \right\}. \quad (12)$$

В результате интегрального представления в (12) операции свертки с функцией  $\exp[-ik\mu_0 l_3(x_6^2 + y_6^2)]/2\tilde{l}l_4$  получим

$$u(x_6, y_6) \sim \exp\left[\frac{ik}{2l_4}(x_6^2 + y_6^2)\right] \left\{ \exp\left[-\frac{ik\mu_0 l_3}{2\tilde{l}l_4}(x_6^2 + y_6^2)\right] \times \right. \\ \times \left\{ \exp\left[\frac{ik\mu_0^2}{2\tilde{l}}(x_6^2 + y_6^2)\right] \otimes \left\{ t\left(-\frac{\mu_0 \mu l}{\tilde{l}}x_6, -\frac{\mu_0 \mu l}{\tilde{l}}y_6\right) \times \right. \right. \\ \times p_1\left[\frac{\mu_0(\Delta + \mu l_2)}{\tilde{l}}x_6, \frac{\mu_0(\Delta + \mu l_2)}{\tilde{l}}y_6\right] \times \\ \times p_2\left(\frac{\mu_0 l_2}{\tilde{l}}x_6, \frac{\mu_0 l_2}{\tilde{l}}y_6\right) \otimes t^*\left(\frac{\mu_0 \mu l}{\tilde{l}}x_6, \frac{\mu_0 \mu l}{\tilde{l}}y_6\right) \times \\ \times p_1\left[\frac{\mu_0(\Delta + \mu l_2)}{\tilde{l}}x_6, \frac{\mu_0(\Delta + \mu l_2)}{\tilde{l}}y_6\right] p_2\left(\frac{\mu_0 l_2}{\tilde{l}}x_6, \frac{\mu_0 l_2}{\tilde{l}}y_6\right) + \\ + t\left[-\frac{\mu_0 \mu l}{\tilde{l}}\left(1 + \frac{\Delta l}{\mu^2 l}\right)x_6, -\frac{\mu_0 \mu l}{\tilde{l}}\left(1 + \frac{\Delta l}{\mu^2 l}\right)y_6\right] \times \\ \times p_1\left[\frac{\mu_0(\Delta + \mu l_2)}{\tilde{l}}x_6, \frac{\mu_0(\Delta + \mu l_2)}{\tilde{l}}y_6\right] p_2\left(\frac{\mu_0 l_2}{\tilde{l}}x_6, \frac{\mu_0 l_2}{\tilde{l}}y_6\right) \otimes \\ \left. \left. \otimes t^*\left[\frac{\mu_0 \mu l}{\tilde{l}}\left(1 + \frac{\Delta l}{\mu^2 l}\right)x_6, \frac{\mu_0 \mu l}{\tilde{l}}\left(1 + \frac{\Delta l}{\mu^2 l}\right)y_6\right] \times \right. \right. \\ \left. \left. \times p_1\left[\frac{\mu_0(\Delta + \mu l_2)}{\tilde{l}}x_6, \frac{\mu_0(\Delta + \mu l_2)}{\tilde{l}}y_6\right] \times \right. \right. \\ \left. \left. \times p_2\left(\frac{\mu_0 l_2}{\tilde{l}}x_6, \frac{\mu_0 l_2}{\tilde{l}}y_6\right) \right\} \right\} \otimes P'_0(x_6, y_6) \right\}. \quad (13)$$

Для  $\Delta l \ll \mu^2 l$

$$t\left[-\frac{\mu_0 \mu l}{\tilde{l}}\left(1 + \frac{\Delta l}{\mu^2 l}\right)x_6, -\frac{\mu_0 \mu l}{\tilde{l}}\left(1 + \frac{\Delta l}{\mu^2 l}\right)y_6\right] = \\ = t\left(-\frac{\mu_0 \mu l}{\tilde{l}}x_6, -\frac{\mu_0 \mu l}{\tilde{l}}y_6\right) \otimes \exp\left[-\frac{ik\mu_0^2 \mu^2 l^2}{2\tilde{l}^2 \Delta l}(x_6^2 + y_6^2)\right],$$

а с учетом действительности функции  $\tau'(x_4, y_4)$

$$t^*\left[\frac{\mu_0 \mu l}{\tilde{l}}\left(1 + \frac{\Delta l}{\mu^2 l}\right)x_6, \frac{\mu_0 \mu l}{\tilde{l}}\left(1 + \frac{\Delta l}{\mu^2 l}\right)y_6\right] = \\ = t^*\left(\frac{\mu_0 \mu l}{\tilde{l}}x_6, \frac{\mu_0 \mu l}{\tilde{l}}y_6\right) \otimes \exp\left[-\frac{ik\mu_0^2 \mu^2 l^2}{2\tilde{l}^2 \Delta l}(x_6^2 + y_6^2)\right].$$

Тогда в результате интегрального представления в (13) операции свертки с функцией  $\exp\left[\frac{ik\mu_0^2}{2\tilde{l}}(x_6^2 + y_6^2)\right]$  распределение комплексной амплитуды поля в плоскости  $(x_6, y_6)$  определяется выражением

$$u'(x_6, y_6) \sim \exp\left[\frac{ik}{2l_4}(x_6^2 + y_6^2)\right] \times \\ \times \left\{ \exp\left[-\frac{ik\mu_0 l_3}{2\tilde{l}l_4}(x_6^2 + y_6^2)\right] \exp\left[\frac{ik\mu_0^2}{2\tilde{l}}(x_6^2 + y_6^2)\right] \times \right. \\ \times \left\{ \exp\left[\frac{ik\mu_0^2}{2\tilde{l}}(x_6^2 + y_6^2)\right] \otimes \{F_1(x_6, y_6) \otimes P'_1(x_6, y_6) \otimes \right. \\ \left. \otimes P'_2(x_6, y_6)\} \{F_2(x_6, y_6) \otimes P'_1(x_6, y_6) \otimes P'_2(x_6, y_6)\} + \right. \\ \left. + \left\{ \exp\left[\frac{ik\mu_0^2 \Delta l}{2\mu^2 l^2}(x_6^2 + y_6^2)\right] F_1(x_6, y_6) \otimes P'_1(x_6, y_6) \otimes \right. \right. \\ \left. \left. \otimes P'_2(x_6, y_6) \right\} \left\{ \exp\left[\frac{ik\mu_0^2 \Delta l}{2\mu^2 l^2}(x_6^2 + y_6^2)\right] F_2(x_6, y_6) \otimes \right. \right. \\ \left. \left. \otimes P'_1(x_6, y_6) \otimes P'_2(x_6, y_6) \right\} \right\} \otimes P'_0(x_6, y_6) \right\}, \quad (14)$$

где

$$F_1(x_6, y_6), F_2(x_6, y_6), P'_1(x_6, y_6), P'_2(x_6, y_6)$$

– Фурье-образы соответственно функций

$$t(-\mu_0 \mu l \xi / \tilde{l}, -\mu_0 \mu l \eta / \tilde{l}), \quad t^*(\mu_0 \mu l \xi / \tilde{l}, \mu_0 \mu l \eta / \tilde{l}), \\ p_1(\mu_0(\Delta + \mu l_2)\xi / \tilde{l}, \mu_0(\Delta + \mu l_2)\eta / \tilde{l}), \quad p_2(\mu_0 l_2 \xi / \tilde{l}, \mu_0 l_2 \eta / \tilde{l})$$

с пространственными частотами  $\mu_0^2 x_6 / \lambda \tilde{l}, \mu_0^2 y_6 / \lambda \tilde{l}$ .

Так как

$$k\mu_0^2 \Delta l (x_6^2 + y_6^2) / \mu^2 l^2 \ll k\mu_0^2 (x_6^2 + y_6^2) / 2\tilde{l},$$

то в силу медленности изменения с координатой функции  $k\mu_0^2 \Delta l (x_6^2 + y_6^2) / \mu^2 l^2$  вынесем ее в (14) из-под знаков интегралов свертки. Кроме того, положим, что размер субъективного спекла в плоскости  $(x_6, y_6)$ , определяемый шириной функции  $P'_0(x_6, y_6)$ , хотя бы на порядок меньше периода изменения

функции  $1 + \exp[ik\mu_0^2\Delta(x_6^2 + y_6^2)/\mu^2l^2]$ . Тогда с учетом интегрального представления операции свертки с функцией  $\exp[-ik\mu_0^2(x_6^2 + y_6^2)/2\tilde{l}]$  и неравенства  $l_2 < (\Delta + \mu l_2)/\mu$  распределение освещенности в плоскости регистрации 3 (см. рис. 4) принимает вид

$$\begin{aligned} I(x_6, y_6) \sim & \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{k\mu_0^2\Delta}{\mu^2\tilde{l}^2} (x_6^2 + y_6^2) \right] \right\} \times \\ & \times \left| \exp \left[ -\frac{ik\mu_0 l_3}{2\tilde{l}l_4} (x_6^2 + y_6^2) \right] \right\} \left\{ \exp \left[ \frac{ik\mu_0^2}{2\tilde{l}} (x_6^2 + y_6^2) \right] \right\} \otimes \\ & \otimes t \left( -\frac{\mu_0\mu l}{\tilde{l}} x_6, -\frac{\mu_0\mu l}{\tilde{l}} y_6 \right) p_1 \left[ \frac{\mu_0(\Delta + \mu l_2)}{\tilde{l}} x_6, \frac{\mu_0(\Delta + \mu l_2)}{\tilde{l}} y_6 \right] \otimes \\ & \otimes t^* \left( \frac{\mu_0\mu l}{\tilde{l}} x_6, \frac{\mu_0\mu l}{\tilde{l}} y_6 \right) \times \\ & \times p_1 \left[ \frac{\mu_0(\Delta + \mu l_2)}{\tilde{l}} x_6, \frac{\mu_0(\Delta + \mu l_2)}{\tilde{l}} y_6 \right] \left\{ \otimes P_0'(x_6, y_6) \right\}^2. \quad (15) \end{aligned}$$

Если на стадии двухэкспозиционной записи спеклограммы матовый экран 1 (см. рис. 1) освещается когерентным излучением с расходящейся сферической волной с радиусом кривизны, равным  $\mu^2 l$ , то распределение освещенности в плоскости  $(x_6, y_6)$  подобно выражению (15), т.е.

$$\begin{aligned} I(x_6, y_6) \sim & \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{k\mu_0^2\Delta}{\mu^2\tilde{l}^2} (x_6^2 + y_6^2) \right] \right\} \times \\ & \times \left| \exp \left[ -\frac{ik\mu_0 l_3}{2\tilde{l}l_4} (x_6^2 + y_6^2) \right] \right\} \left\{ \exp \left[ \frac{ik\mu_0^2}{2\tilde{l}} (x_6^2 + y_6^2) \right] \right\} \otimes \\ & \otimes t \left( -\frac{\mu_0\mu l}{\tilde{l}} x_6, -\frac{\mu_0\mu l}{\tilde{l}} y_6 \right) \exp \left[ \frac{ik\mu_0^2 l}{\tilde{l}^2} (x_6^2 + y_6^2) \right] \times \\ & \times p_1 \left[ \frac{\mu_0(\Delta + \mu l_2)}{\tilde{l}} x_6, \frac{\mu_0(\Delta + \mu l_2)}{\tilde{l}} y_6 \right] \otimes \\ & \otimes t^* \left( \frac{\mu_0\mu l}{\tilde{l}} x_6, \frac{\mu_0\mu l}{\tilde{l}} y_6 \right) \exp \left[ -\frac{ik\mu_0^2 l}{\tilde{l}^2} (x_6^2 + y_6^2) \right] \times \\ & \times p_1 \left[ \frac{\mu_0(\Delta + \mu l_2)}{\tilde{l}} x_6, \frac{\mu_0(\Delta + \mu l_2)}{\tilde{l}} y_6 \right] \left\{ \otimes P_0'(x_6, y_6) \right\}^2, \quad (16) \end{aligned}$$

в котором отличие заключается только в другом распределении освещенности в субъективной спекл-структуре.

Из (15), (16) следует, что в плоскости  $(x_6, y_6)$  в пределах области, зависящей от ширины функции

$$\begin{aligned} & p_1[\mu_0(\Delta + \mu l_2)x_6/\tilde{l}, \mu_0(\Delta + \mu l_2)y_6/\tilde{l}] \otimes \\ & \otimes p_1[\mu_0(\Delta + \mu l_2)x_6/\tilde{l}, \mu_0(\Delta + \mu l_2)y_6/\tilde{l}], \end{aligned}$$

субъективная спекл-структура промодулирована полосами равного наклона — системой концентрических интерференционных колец. Причем измерение их радиусов в соседних порядках интерференции обеспечивает возможность определения про-

дольного перемещения диффузно рассеивающей свет плоской поверхности для известных величин  $\lambda, \mu, \mu_0, l$ . Кроме того, чувствительность спекл-интерферометра к продольному перемещению рассеивателя зависит от масштаба в плоскости спеклограммы Фурье-образа функции, характеризующей комплексную амплитуду пропускания матового экрана 1 (см. рис. 1), находящегося в плоскости  $(x_1, y_1)$ . При этом чувствительность увеличивается с уменьшением масштаба Фурье-образа  $F(x_4, y_4)$ , так как это обстоятельство приводит к увеличению неоднородного (изменяющегося по радиусу от оптической оси) смещения в плоскости спеклограммы субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции.

Согласно вышеприведенному анализу образования спекл-интерференционной картины, характеризующей продольное перемещение рассеивателя, необходимо выполнение условий  $\Delta l \ll \mu^2 l$  и

$$[k\mu_0^2\Delta(x_6^2 + y_6^2)/\mu^2\tilde{l}^2] \ll k\mu_0(x_6^2 + y_6^2)/2\tilde{l},$$

на основании которых  $\tilde{l} = l/2$ . Тогда, как и в [5, 6], для регистрации высококонтрастной интерференционной картины необходимо, чтобы расстояние  $l_3$  на рис. 4 равнялось  $\tilde{l}$ .

В эксперименте на стадии двухэкспозиционной записи спеклограммы с ранее приведенными параметрами зрительной трубы Галилея и значениями расстояний  $l_1, l_2$  матовый экран 1 (см. рис. 1) освещался когерентным излучением со сходящейся сферической волной с радиусом кривизны  $R = \mu^2 l = 1122$  мм. Перед повторным экспонированием фотопластинки рассеиватель перемещался на величину  $\Delta l = (3 \pm 0,002)$  или  $(4 \pm 0,002)$  мм.

При воспроизведении спеклограммы коллимированным пучком диаметром 40 мм выполнялась пространственная фильтрация дифракционного поля в ближней зоне дифракции с помощью апертурной диафрагмы  $p_0$  (см. рис. 4) диаметром 2 мм объектива с фокусным расстоянием  $f_0 = 50$  мм. При этом предметная плоскость для него находилась на расстоянии 258,5 мм  $(\tilde{l} + l_3)$ , а расстояние  $l_3$  составляло 129 мм.

Для зарегистрированных спекл-интерферограмм, представленных на рис. 5, определялось продольное перемещение матового экрана для известных величин  $\lambda, \mu, \mu_0, l$  и радиусов интерференционных колец в соседних порядках интерференции. С точностью до ошибки (10%), допускаемой в эксперименте, рассчитанные таким образом значения продольного перемещения рассеивателя соответствуют  $\Delta l = 3$  и 4 мм.

Как и в голографическом интерферометре [1], имеются причины, из-за которых необходимо рассмотрение двухэкспозиционной записи спеклограмм согласно рис. 6 с целью определения чувствительности спекл-интерферометра к поперечному или продольному перемещению диффузно рассеивающей свет плоской поверхности.

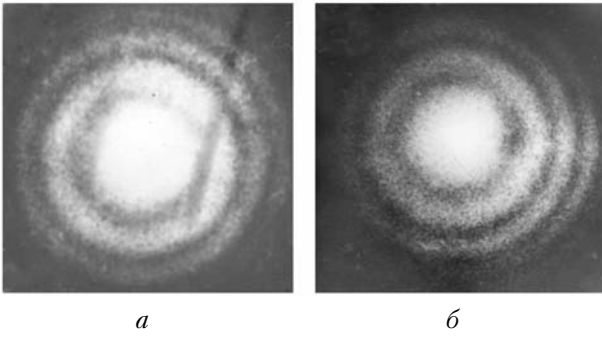


Рис. 5. Спекл-интерференционные картины, характеризующие продольное перемещение рассеивателя на величину  $\Delta l = 3$  мм (а), 4 мм (б)

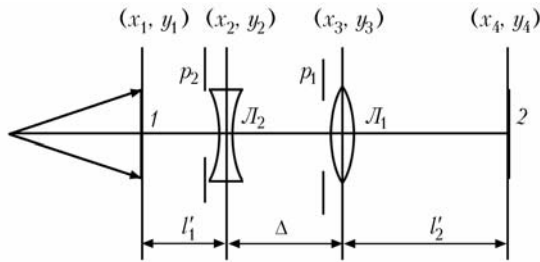


Рис. 6. Схема двухэкспозиционной записи спеклограммы: 1 – матовый экран; 2 – фотопластинка;  $L_1$  – положительная линза;  $L_2$  – отрицательная линза;  $p_1, p_2$  – апертурные диафрагмы

В том случае, когда перед рассеивателем находится окуляр зрительной трубы Галилея и перед повторным экспонированием фотопластинки 2 осуществляется перемещение матового экрана 1 в плоскости его расположения в направлении оси  $x$  на величину  $a$ , распределения в плоскости  $(x_4, y_4)$  комплексных амплитуд поля, соответствующих первой и второй экспозициям, на основании [1] имеют вид

$$\begin{aligned} \tilde{u}_1(x_4, y_4) \sim \exp\left[\frac{ik}{2l'}(x_4^2 + y_4^2)\right] \times \\ \times \left\{ \tilde{F}(x_4, y_4) \otimes \exp\left[-\frac{ik\mu^2 R}{2l'(\mu^2 R + l')}(x_4^2 + y_4^2)\right] \otimes \right. \\ \left. \otimes \tilde{P}_1(x_4, y_4) \otimes \tilde{P}_2(x_4, y_4) \right\}, \quad (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{u}_2(x_4, y_4) \sim \exp\left[-\frac{ik(\mu^2 R + l')a^2}{2Rl'}\right] \times \\ \times \exp\left(\frac{ik\mu a x_4}{l'}\right) \exp\left[\frac{ik}{2l'}(x_4^2 + y_4^2)\right] \times \\ \times \left\{ \tilde{F}(x_4, y_4) \otimes \exp\left[-\frac{ik\mu^2 R}{2l'(\mu^2 R + l')}(x_4^2 + y_4^2)\right] \otimes \right. \\ \left. \otimes \exp\left(-\frac{ik\mu a x_4}{l'}\right) \left\{ \tilde{P}_1(x_4, y_4) \otimes \tilde{p}_2\left[x_4 + \frac{(\mu^2 R + l')}{\mu R} a, y_4\right] \right\} \right\}, \quad (18) \end{aligned}$$

где  $l' = l_2 + \mu\Delta + \mu^2 l_1'$ ,  $l_1'$  – расстояние между матовым экраном и главной плоскостью линзы  $L_2$  (окуляр зрительной трубы),  $l_2$  – расстояние между главной плоскостью линзы  $L_1$  (объектив зрительной трубы) и фотопластинкой;  $\tilde{F}(x_4, y_4)$  – Фурье-образ функции  $t(x_1, y_1)$  с пространственными частотами  $\mu x_4/\lambda l'$ ,  $\mu y_4/\lambda l'$ ;  $\tilde{P}_1(x_4, y_4)$  – Фурье-образ функции  $p_1(x_3, y_3)$  зрачка объектива зрительной трубы с пространственными частотами  $x_4/\lambda l_2'$ ,  $y_4/\lambda l_2'$ ;  $\tilde{P}_2(x_4, y_4)$  – Фурье-образ функции  $p_2(x_2, y_2)$  зрачка окуляра зрительной трубы с пространственными частотами  $\mu x_4/\lambda(\mu\Delta + l_2)$ ,  $\mu y_4/\lambda(\mu\Delta + l_2)$ .

Из (17), (18) следует, что в плоскости фотопластинки в общем случае формируется квази-Фурье-образ функции пропускания матового экрана, каждая точка которого уширена до размера субъективного спекла, определяемого шириной функции  $\tilde{P}_1(x_4, y_4) \otimes \tilde{P}_2(x_4, y_4)$ , и на субъективное спекл-поле наложено распределение фазы расходящейся сферической волны с радиусом кривизны  $l'$ . В частном случае освещения рассеивателя когерентным излучением со сходящейся сферической волной с радиусом кривизны, равным  $l'/\mu^2$ , распределение комплексной амплитуды поля в плоскости  $(x_4, y_4)$  соответствует Фурье-образу функции  $t(x_1, y_1)$ . В свою очередь, для распределения комплексной амплитуды, соответствующей второй экспозиции, в отличие от (2) характерно однородное смещение в плоскости спеклограммы составляющей субъективного спекла, обусловленной дифракцией плоской волны на зрачке окуляра зрительной трубы Галилея, на величину  $(\mu^2 R + l')a/\mu R$ .

При условии выполнения двухэкспозиционной записи спеклограммы согласно рис. 6 на линейном участке кривой почернения фотоматериала распределение комплексной амплитуды ее пропускания без учета постоянной составляющей определяется выражением

$$\begin{aligned} \tilde{\tau}(x_4, y_4) \sim \left\{ \tilde{F}(x_4, y_4) \otimes \exp\left[-\frac{ik\mu^2 R}{2l'(\mu^2 R + l')}(x_4^2 + y_4^2)\right] \otimes \right. \\ \left. \otimes \tilde{P}_1(x_4, y_4) \otimes \tilde{P}_2(x_4, y_4) \right\} \{ \text{к.с.} \} + \left\{ \tilde{F}(x_4, y_4) \otimes \right. \\ \left. \otimes \exp\left[-\frac{ik\mu^2 R}{2l'(\mu^2 R + l')}(x_4^2 + y_4^2)\right] \otimes \exp\left(-\frac{ik\mu a x_4}{l'}\right) \times \right. \\ \left. \times \left\{ \tilde{P}_1(x_4, y_4) \otimes \tilde{P}_2\left(x_4 + \frac{\mu^2 R + l'}{\mu R} a, y_4\right) \right\} \right\}. \quad (19) \end{aligned}$$

Положим, что на стадии воспроизведения двухэкспозиционной спеклограммы согласно рис. 2 в общем случае в ее плоскости вне оптической оси проводится пространственная фильтрация дифракционного поля с помощью непрозрачного экрана



с круглым отверстием. При этом диаметр фильтрующего отверстия, центр которого имеет координаты  $(x_{04}, 0)$ , много больше размера субъективного спекла в плоскости спеклограммы. Тогда результаты вычислений, подобных вычислениям, выполненным для случая, когда перед рассеивателем находился объектив зрительной трубы Галилея, приводят к распределению освещенности в задней фокальной плоскости линзы  $L_0$  (см. рис. 2) с фокусным расстоянием  $f_0$  с учетом неравенства  $l'_2 < (\Delta + \mu l'_2)/\mu$  [1] в виде

$$\begin{aligned} \tilde{I}(x_5, y_5) \sim & \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{k(\mu^2 R + l')}{\mu R f_0} a x_5 \right] \right\} \times \\ & \times \left| p_2 \left( \frac{\Delta + \mu l'_2}{f_0} x_5, \frac{\Delta + \mu l'_2}{f_0} y_5 \right) t \left( -\frac{l'}{\mu f_0} x_5, -\frac{l'}{\mu f_0} y_5 \right) \right| \times \\ & \times \exp \left[ \frac{ikl'(\mu^2 R + l')}{2\mu^2 R f_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \exp \left( \frac{i2kx_{04}x_5}{f_0} \right) \otimes \\ & \otimes p_2 \left( \frac{\Delta + \mu l'_2}{f_0} x_5, \frac{\Delta + \mu l'_2}{f_0} y_5 \right) t^* \left( \frac{l'}{\mu f_0} x_5, \frac{l'}{\mu f_0} y_5 \right) \times \\ & \times \exp \left[ -\frac{ikl'(\mu^2 R + l')}{2\mu^2 R f_0^2} (x_5^2 + y_5^2) \right] \times \\ & \times \exp \left( \frac{i2kx_{04}x_5}{f_0} \right) \otimes P_0(x_5, y_5) \Big|^2. \quad (20) \end{aligned}$$

Из (20) следует, что в пределах области, определяемой шириной функции

$$p_2 \left( \frac{\Delta + \mu l'_2}{f_0} x_5, \frac{\Delta + \mu l'_2}{f_0} y_5 \right) \otimes p_2 \left( \frac{\Delta + \mu l'_2}{f_0} x_5, \frac{\Delta + \mu l'_2}{f_0} y_5 \right),$$

субъективная спекл-структура промодулирована интерференционными полосами, которые периодически изменяются на оси  $x$ . Измерение их периода для известных величин  $\lambda, \mu, R, l', f_0$  обеспечивает возможность определения величины поперечного перемещения диффузно рассеивающей свет плоской поверхности. При этом, как и в случае записи спеклограммы, когда рассеиватель находится перед объективом зрительной трубы Галилея, чувствительность спекл-интерферометра зависит как от величины, так и от знака радиуса кривизны сферической волны когерентного излучения, используемого для освещения рассеивателя на стадии записи спеклограммы. Так, для положительной величины  $R$  период  $\Delta \tilde{x}_5 = \lambda \mu R f_0 / (\mu^2 R + l') a$  интерференционных полос уменьшается с уменьшением  $R$  из-за увеличения смещения в плоскости спеклограммы указанной выше составляющей субъективного спекла, соответствующего второй экспозиции. В свою очередь, при освещении матового экрана  $1$  (см. рис. 6) излучением со сходящейся сферической волной период интерференционных полос увеличивается с уменьшением  $R$  в интервале  $(l'/\mu^2) \leq R \leq \infty$

вплоть до бесконечности, когда  $R = l'/\mu^2$  и в плоскости спеклограммы формируется Фурье-образ функции  $t(x_1, y_1)$ . В этом случае отсутствует смещение в плоскости спеклограммы составляющей субъективного спекла, обусловленной дифракцией плоской волны на зрачке окуляра зрительной трубы. Дальнейшее уменьшение величины  $R$  приводит к увеличению чувствительности интерферометра из-за возникновения и увеличения смещения в плоскости спеклограммы составляющей субъективного спекла, соответствующего второй экспозиции.

Сравнение рассматриваемого спекл-интерферометра для контроля поперечного перемещения рассеивателя с голографическим интерферометром [1], в котором на стадии записи голограммы окуляр зрительной трубы находится перед диффузно рассеивающей свет поверхностью, а на стадии ее восстановления интерференционная картина регистрируется в плоскости формирования изображения рассеивателя, показывает, что чувствительность их одинакова. При этом отличие их состоит в том же, в чем состоит отличие голографического интерферометра от спекл-интерферометра, когда на стадии записи как голограммы, так и спеклограммы рассеиватель находился перед объективом зрительной трубы Галилея.

В эксперименте на стадии двухэкспозиционной записи спеклограммы по схеме на рис. 6 для контроля поперечного перемещения матового экрана с вышеуказанными параметрами зрительной трубы расстояния  $l'_1, l'_2$  равнялись соответственно 150, 200 мм. При этом перед повторным экспонированием фотопластинки поперечное перемещение матового экрана осуществлялось на величину  $a = (0,025 \pm 0,002)$  мм, как и при двухэкспозиционной записи спеклограммы согласно рис. 1. Кроме того, на стадии воспроизведения спеклограммы аналогичным образом проводилась регистрация спекл-интерферограмм в фокальной плоскости объектива с фокусным расстоянием  $f_0 = 50$  мм.

В качестве примера на рис. 7 представлены спекл-интерферограммы, когда на стадии записи спеклограммы рассеиватель освещался коллимированным пучком (рис. 7, а), излучением с расходящейся сферической волной с радиусом кривизны  $R = 500$  мм (рис. 7, б), со сходящейся сферической волной с радиусом кривизны  $R = 500$  мм (рис. 7, в).

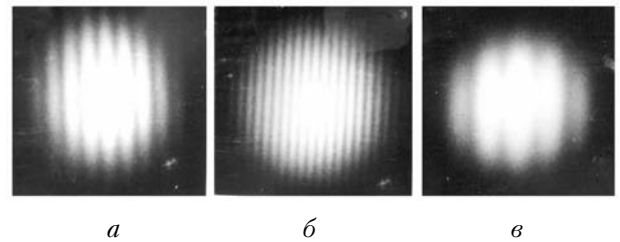


Рис. 7. Спекл-интерференционные картины, характеризующие поперечное перемещение матового экрана при его освещении коллимированным пучком (а), излучением с расходящейся (б), сходящейся (в) сферической волной

В этих трех случаях, как и в других, связанных с изменением на стадии записи спеклограммы как величины, так и знака радиуса кривизны сферической волны когерентного излучения, используемого для освещения матового экрана, для известных величин  $\lambda$ ,  $a$ ,  $\mu$ ,  $l'$ ,  $R$ ,  $f_0$  рассчитывались периоды интерференционных полос и сравнивались с результатами их измерений. С точностью до ошибки (10%), допускаемой в эксперименте, имеет место их соответствие.

Следует отметить, что для реализуемого в эксперименте частного случая, если  $l'_1 = l_2$  и  $l'_2 = l_1$ , то  $l' = \mu^2 l$ . Тогда в схемах записи спеклограмм (см. рис. 1 и 6) масштабы Фурье-образов  $\tilde{F}(x_4, y_4)$ ,  $F(x_4, y_4)$  функции  $t(x_1, y_1)$  одинаковы в их плоскостях. В этом случае на основании сравнения выражений (20) с (7) и (18) с (4) при  $R = \infty$  чувствительность к поперечному перемещению рассеивающей свет плоской поверхности спекл-интерферометра, в котором на стадии двухэкспозиционной записи спеклограммы окуляр зрительной трубы Галилея находится перед рассеивателем, в  $\mu^2$  раз выше, что соответствует экспериментально полученным результатам (сравним рис. 7, а и рис. 3, б).

В случае контроля продольного перемещения матового экрана 1 (см. рис. 6) при двухэкспозиционной записи спеклограммы распределения в ней комплексных амплитуд полей, соответствующих первой и второй экспозициям, на основании [1], когда рассеиватель освещается когерентным излучением со сходящейся сферической волной с радиусом кривизны  $R = l' / \mu^2$ , имеют вид

$$\tilde{u}_1(x_4, y_4) \sim \exp\left[\frac{ik}{2l'}(x_4^2 + y_4^2)\right] \times [\tilde{F}(x_4, y_4) \otimes \tilde{P}_1(x_4, y_4) \otimes \tilde{P}_2(x_4, y_4)], \quad (21)$$

$$\tilde{u}_2(x_4, y_4) \sim \exp(ik\Delta l) \exp\left[-\frac{ik\mu^2\Delta l}{2l'^2}(x_4^2 + y_4^2)\right] \times \exp\left[\frac{ik}{2l'}(x_4^2 + y_4^2)\right] [\tilde{F}'(x_4, y_4) \otimes \tilde{P}_1(x_4, y_4) \otimes \tilde{P}_2(x_4, y_4)], \quad (22)$$

где  $\tilde{F}'(x_4, y_4)$  — Фурье-образ функции  $t(x_1, y_1)$  с пространственными частотами  $\mu x_4 / \lambda l'(1 + \mu^2 \Delta l / l')$ ,  $\mu y_4 / \lambda l'(1 + \mu^2 \Delta l / l')$ .

При условии выполнения двухэкспозиционной записи спеклограммы на линейном участке кривой почернения фотоматериала распределение комплексной амплитуды ее пропускания без учета постоянной составляющей на основании (21), (22) определяется выражением

$$\tilde{\tau}(x_4, y_4) \sim [\tilde{F}(x_4, y_4) \otimes \tilde{P}_1(x_4, y_4) \otimes \tilde{P}_2(x_4, y_4)] [\text{к.с.}] + [\tilde{F}'(x_4, y_4) \otimes \tilde{P}_1(x_4, y_4) \otimes \tilde{P}_2(x_4, y_4)] [\text{к.с.}]. \quad (23)$$

Положим, что на стадии воспроизведения двухэкспозиционной спеклограммы согласно рис. 4 пространственная фильтрация дифракционного поля выполняется на оптической оси. Тогда результаты вычислений, подобных вычислениям, которые были выполнены для случая, когда перед рассеивателем находился объектив зрительной трубы, приводят к распределению освещенности в плоскости регистрации 3 (см. рис. 4) с учетом неравенства  $l'_2 < (\Delta + \mu l'_2) / \mu$  в виде

$$\begin{aligned} \tilde{I}'(x_6, y_6) \sim & \left\{ 1 + \cos\left[\frac{k\mu_0^2\mu^2\Delta l}{l'^2}(x_6^2 + y_6^2)\right] \right\} \times \\ & \times \left| \exp\left[-\frac{ik\mu_0' l_3}{2\tilde{l}' l_4}(x_6^2 + y_6^2)\right] \right\} \left\{ \exp\left[\frac{ik\mu_0'^2}{2\tilde{l}'}(x_6^2 + y_6^2)\right] \otimes \right. \\ & \otimes t\left(-\frac{\mu_0' l'}{\mu \tilde{l}'} x_6, -\frac{\mu_0' l'}{\mu \tilde{l}'} y_6\right) p_2\left[\frac{\mu_0'(\Delta + \mu l'_2)}{\tilde{l}'} x_6, \frac{\mu_0'(\Delta + \mu l'_2)}{\tilde{l}'} y_6\right] \otimes \\ & \left. \otimes t^*\left(\frac{\mu_0' l'}{\mu \tilde{l}'} x_6, \frac{\mu_0' l'}{\mu \tilde{l}'} y_6\right) p_2\left[\frac{\mu_0'(\Delta + \mu l'_2)}{\tilde{l}'} x_6, \frac{\mu_0'(\Delta + \mu l'_2)}{\tilde{l}'} y_6\right] \right\} \otimes \\ & \otimes P_0'(x_6, y_6) \Big|^2, \quad (24) \end{aligned}$$

где  $\mu_0' = (\tilde{l}' + l_3) / l_4$  — коэффициент масштабного преобразования;  $\tilde{l}' = l' / 2$  — величина, которая следует из выполнения условий

$$\Delta l \ll l' l \mu^2 \text{ и } [k\mu_0'^2\mu^2\Delta l(x_6^2 + y_6^2) / l'^2] \ll k\mu_0'^2(x_6^2 + y_6^2) / 2\tilde{l}'.$$

В свою очередь, при освещении рассеивателя на стадии записи спеклограммы излучением с сходящейся сферической волной с радиусом кривизны  $R = l' / \mu^2$  распределение освещенности в плоскости  $(x_6, y_6)$  подобно выражению (24), т.е.

$$\begin{aligned} \tilde{I}'(x_6, y_6) \sim & \left\{ 1 + \cos\left[\frac{k\mu_0^2\mu^2\Delta l}{l'^2}(x_6^2 + y_6^2)\right] \right\} \times \\ & \times \left| \exp\left[-\frac{ik\mu_0' l_3}{2\tilde{l}' l_4}(x_6^2 + y_6^2)\right] \right\} \left\{ \exp\left[\frac{ik\mu_0'^2}{2\tilde{l}'}(x_6^2 + y_6^2)\right] \otimes \right. \\ & \otimes t\left(-\frac{\mu_0' l'}{\mu \tilde{l}'} x_6, -\frac{\mu_0' l'}{\mu \tilde{l}'} y_6\right) \exp\left[\frac{k\mu_0'^2\mu^2 l'}{\mu^2 \tilde{l}'^2}(x_6^2 + y_6^2)\right] \times \\ & \times p_2\left[\frac{\mu_0'(\Delta + \mu l'_2)}{\tilde{l}'} x_6, \frac{\mu_0'(\Delta + \mu l'_2)}{\tilde{l}'} y_6\right] \otimes \\ & \left. \otimes t^*\left(\frac{\mu_0' l'}{\mu \tilde{l}'} x_6, \frac{\mu_0' l'}{\mu \tilde{l}'} y_6\right) \exp\left[-\frac{k\mu_0'^2 l'}{\mu^2 \tilde{l}'^2}(x_6^2 + y_6^2)\right] \times \right. \\ & \left. \times p_2\left[\frac{\mu_0'(\Delta + \mu l'_2)}{\tilde{l}'} x_6, \frac{\mu_0'(\Delta + \mu l'_2)}{\tilde{l}'} y_6\right] \right\} \otimes P_0'(x_6, y_6) \Big|^2. \quad (25) \end{aligned}$$

Из (24), (25) следует, что в плоскости  $(x_6, y_6)$  в пределах области, зависящей от ширины функции

$$p_2 \left[ \frac{\mu'_0(\Delta + \mu l'_2)}{\tilde{l}} x_6, \frac{\mu'_0(\Delta + \mu l'_2)}{\tilde{l}} y_6 \right] \otimes \otimes p_2 \left[ \frac{\mu'_0(\Delta + \mu l'_2)}{\tilde{l}} x_6, \frac{\mu'_0(\Delta + \mu l'_2)}{\tilde{l}} y_6 \right],$$

субъективная спекл-структура промодулирована полосами равного наклона — системой концентрических интерференционных колец. Причем измерение их радиусов в соседних порядках интерференции обеспечивает возможность определения продольного перемещения диффузно рассеивающей свет плоской поверхности для известных величин  $\lambda, \mu, \mu'_0, l'$ . Кроме того, чувствительность спекл-интерферометра к продольному перемещению рассеивателя зависит от масштаба в плоскости спеклограммы Фурье-образа  $\tilde{F}(x_4, y_4)$  функции, характеризующей комплексную амплитуду пропускания матового экрана  $t$  (см. рис. 6), находящегося в плоскости  $(x_1, y_1)$ , и она увеличивается с уменьшением масштаба Фурье-образа  $\tilde{F}(x_4, y_4)$ . При этом, как и в [5, 6], для регистрации высококонтрастной интерференционной картины необходимо, чтобы расстояние  $l_3$  на рис. 4 равнялось  $\tilde{l}$ .

В эксперименте на стадии двухэкспозиционной записи спеклограммы по схеме на рис. 6 для контроля продольного перемещения матового экрана на  $\Delta l = (1 \pm 0,002), (2 \pm 0,002)$  и  $(3 \pm 0,002)$  мм расстояния  $l'_1, l'_2$  соответственно равнялись 150 и 200 мм, а рассеиватель освещался когерентным излучением с расходящейся или сходящейся сферической волной с радиусом кривизны  $R = (l' / \mu^2) = 258,5$  мм.

При воспроизведении спеклограммы коллимированным пучком диаметром 40 мм в ближней зоне дифракции выполнялась пространственная фильтрация дифракционного поля с помощью апертурной диафрагмы  $p_0$  (см. рис. 4) диаметром 3 мм объектива с фокусным расстоянием  $f_0 = 135$  мм. Причем предметная плоскость для него находилась на расстоянии 1122 мм ( $\tilde{l} + l_3$ ), а расстояние  $l_3$  составляло 561 мм.

Для зарегистрированных спекл-интерферограмм, представленных на рис. 8, определялось продольное перемещение рассеивателя для известных значений  $\lambda, \mu, \mu'_0, l'$  и радиусов интерференционных колец в соседних порядках интерференции.

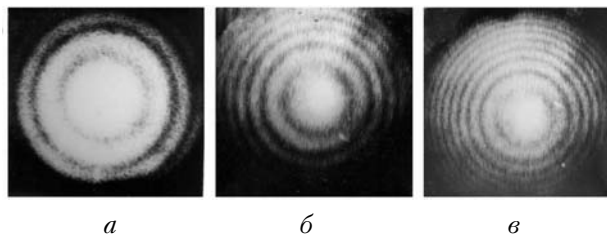


Рис. 8. Спекл-интерференционные картины, характеризующие продольное перемещение рассеивателя на величину  $\Delta l = 1$  мм (а), 2 мм (б), 3 мм (в). Матовый экран на стадии записи спеклограммы освещается излучением с расходящейся сферической волной (а), сходящейся (б, в)

С точностью до ошибки (10%), допускаемой в эксперименте, рассчитанные таким образом значения продольного перемещения матового экрана соответствуют  $\Delta l = 1, 2$  и 3 мм.

Необходимо отметить, что для реализуемого в эксперименте частного случая, когда  $l'_1 = l_2, l'_2 = l_1$ , в плоскости  $(x_4, y_4)$  спеклограмм, запись которых выполнялась согласно рис. 1 и 6, масштабы  $\tilde{F}(x_4, y_4), F(x_4, y_4)$  Фурье-образов функции  $t(x_1, y_1)$  одинаковы. Однако из сравнения  $\tilde{F}'(x_4, y_4)$  с  $F(x_4, y_4)$  следует, что в случае двухэкспозиционной записи спеклограммы, когда окуляр зрительной трубы Галилея находится перед рассеивателем, изменение масштаба Фурье-образа  $\tilde{F}'(x_4, y_4)$  по сравнению с масштабом Фурье-образа  $F(x_4, y_4)$  увеличивается в  $\mu^2$  раз. Поэтому из-за увеличения неоднородного (изменяющегося по радиусу от оптической оси) смещения в плоскости спеклограммы субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции, по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции, в  $\mu^2$  раз увеличивается чувствительность спекл-интерферометра к продольному перемещению рассеивателя. Кроме того, при воспроизведении спеклограмм, характеризующих продольное перемещение рассеивателя, их смещение сопровождается, как и в [5, 6], параллаксом интерференционных полос.

Таким образом, результаты теоретического анализа формирования спекл-интерференционных картин, характеризующих поперечное или продольное перемещение рассеивателя при использовании зрительной трубы Галилея, и проведенные экспериментальные исследования показали следующее.

Чувствительность спекл-интерферометра к поперечному перемещению диффузно рассеивающей свет плоской поверхности одинакова с чувствительностью голографического интерферометра, в котором регистрируется интерференционная картина, локализуемая в плоскости формирования изображения рассеивателя, из-за идентичного механизма образования интерференционной картины, который обусловлен однородным смещением в плоскости голограммы или спеклограммы составляющей субъективного спекла, соответствующего второй экспозиции.

В случае контроля продольного перемещения рассеивателя механизм образования спекл-интерференционных картин обусловлен неоднородным (изменяющимся по радиусу от оптической оси) смещением в плоскости спеклограммы субъективных спеклов, соответствующих второй экспозиции по отношению к идентичным спеклам первой экспозиции. Причем он не связан с механизмом образования интерференционных картин, определяющих чувствительность к продольному перемещению диффузно рассеивающей свет плоской поверхности в голографическом интерферометре. Чувствительность спекл-интерферометра зависит от масштаба в плоскости спеклограмм Фурье-образа функции, характеризующей комплексную амплитуду пропускания

или отражения рассеивателя, и она увеличивается с уменьшением масштаба Фурье-образа. При этом в частном случае двухэкспозиционной записи спеклограмм, когда масштабы Фурье-образов одинаковы, что реализуется при определенном расположении на стадии записи спеклограмм объектива или окуляра зрительной трубы Галилея перед рассеивателем, чувствительность к продольному перемещению диффузно рассеивающей свет поверхности выше, когда перед рассеивателем находится окуляр зрительной трубы.

1. *Гусев В.Г.* Формирование в диффузно рассеивающих полях интерференционных картин при двухэкспозиционной записи с помощью телескопической системы Галилея квази-Фурье и Фурье-голограмм // *Оптика атмосфер. и океана*. 2008. Т. 21. № 5. С. 450–468.
2. *Гудмен Д.* Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 360 с.

3. *Гусев В.Г.* Пространственная фильтрация голографических интерферограмм бокового сдвига // *Оптика и спектроскопия*. 1991. Т. 71. Вып. 1. С. 171–174.
4. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970. 846 с.
5. *Гусев В.Г.* Формирование спекл-интерференционных картин, характеризующих поперечное или продольное перемещение диффузно рассеивающей свет поверхности. Ч. I // *Оптика атмосфер. и океана*, 2007. Т. 20. № 8. С. 734–744.
6. *Гусев В.Г.* Формирование спекл-интерференционных картин, характеризующих поперечное или продольное перемещение диффузно рассеивающей свет поверхности. Ч. II // *Оптика атмосфер. и океана*. 2008. Т. 21. № 3. С. 256–268.
7. *Гусев В.Г.* Формирование голографических интерферограмм бокового сдвига в диффузно рассеянных полях для контроля телескопической оптической системы // *Оптика атмосфер.* 1991. Т. 4. № 8. С. 787–795.
8. *Джоунс Р., Уайкс К.* Голографическая и спекл-интерферометрия. М.: Мир, 1986. 320 с.

***V.G. Gusev. Formation of speckle-interference fringes for the determination of transversal or longitudinal displacements of the surface, diffusively scattering light, using the Galilean telescope.***

Analysis of sensitivity of the speckle interferometer to transversal or longitudinal displacements of plate surface, diffusively scattering light, is presented, when the Galilean telescope is used to record the specklogram. It is shown that the sensitivity of the interferometer to transversal displacement is defined by the radius of curvature of the spherical wave of radiation, illuminating the surface. The sensitivity of the interferometer to longitudinal displacement is defined by the scale of Fourier-transfer function characterized the complex amplitude of the reflection or the transmission of the surface scattering light. The experimental results are in agreement with theoretical arguments.