

# Изучение поведения субъективных спеклов в зависимости от типа входной апертуры

М.Н. Осипов<sup>1</sup>, Р.Н. Сергеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

<sup>2</sup>АО «РКЦ «Прогресс», Земеца 18, Самара, Россия, 443009

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования, показывающие возможность снижения размеров спеклов для повышения чувствительности и точности измерительной системы на основе применения методов спекл-фотографии и спекл-интерферометрии. Представлены теоретические и экспериментальные результаты моделирования одиночного спекла.

## 1. Введение

Спекл-интерферометрия, в силу низкой требовательности к стабильности оптической системы (в сравнении с голографической интерферометрией), получает широкое распространение для использования в промышленных условиях [1,5,3,14].

Чувствительность спекл-интерферометрии к определению величины перемещения зависит от размеров спекл-структуры, которая определяется параметрами используемой оптической системы при записи субъективной спекл-структуры, т.е. числовой апертурой оптической системы. Увеличение числовой апертуры оптической системы приводит к уменьшению размеров регистрируемой спекл-структуры и, следовательно, к увеличению чувствительности спекл-интерферометрии. Однако, с другой стороны, увеличение числовой апертуры оптической системы приводит к требованию использования высококачественной оптики, так как при таких параметрах начинают существенным образом сказываться аберрации оптической системы, которые приводят к искажению регистрируемой информации. Теоретические и экспериментальные исследования принципов работы оптических приборов показали, что наличие в них кольцевых апертурных диафрагм позволяет повысить разрешающую способность зеркальных телескопов и объективов [6,12].

В работе представлены результаты исследования, показывающие возможность снижения размеров спеклов для повышения чувствительности и точности измерительной системы на основе применения методов спекл-фотографии и спекл-интерферометрии. Представлены теоретические и экспериментальные результаты моделирования одиночного спекла.

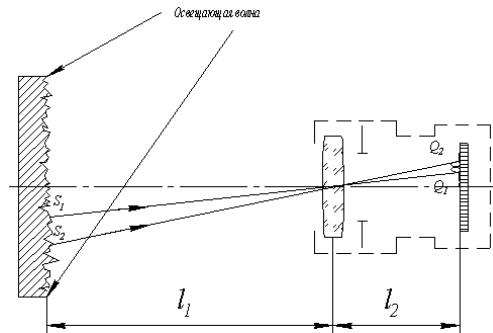
## 2. Теоретическое и экспериментальное моделирование поведения одиночного спекла в зависимости от типа входной апертуры

Спекл-картину наблюдаемую и регистрируемую на некотором расстоянии от диффузно рассеивающей поверхности, называют объективной, а формируемую в плоскости изображения оптической системой – субъективной. Формирование субъективной спекл-картины представлено на рисунке 1. Распределение интенсивности в изображении точечного источника

света, сформированном оптической системой с круглой апертурой описывает функция Бесселя первого порядка [1,12]:

$$I(x, y) = I_0(x, y) \left( \left[ \frac{2J_1(kaw)}{kaw} \right] \right)^2, \quad (1)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$ , ( $\lambda$  – длина волны лазерного излучения);  $w$  – синус угла между направлением, в котором определяется интенсивность в плоскости изображения и оптической осью;  $a$  – радиус круглой апертуры оптической системы.



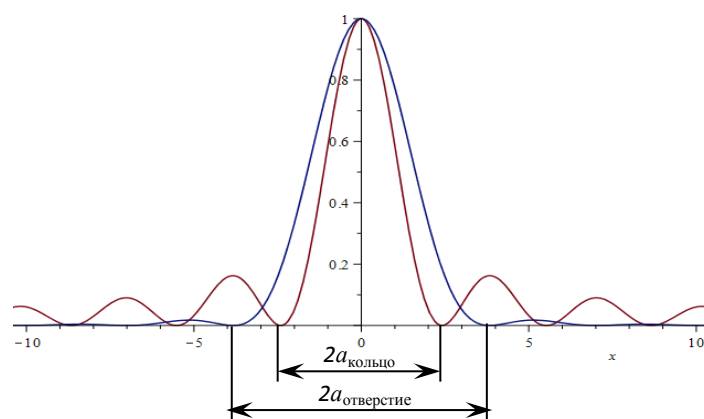
**Рисунок 1.** Схема регистрации субъективных спеклов.

Это изображение, можно интерпретировать дифракционной картиной от круглого отверстия на бесконечности. Характерным для такой дифракционной картины (рис. 2) является наличие яркого центрального пятна (диск Эйри), окруженного кольцами, интенсивность которых значительно меньше интенсивности центрального пятна.

В оптической системе с кольцеобразной апертурой, ограниченной двумя концентрическими окружностями с радиусами  $a$  и  $\varepsilon a$ , дифракционная картина описывается следующим выражением:

$$I(x, y) = I_0(x, y) \left( \left[ \frac{2J_1(kaw)}{kaw} \right] - \varepsilon^2 \left[ \frac{2J_1(k\varepsilon aw)}{k\varepsilon aw} \right] \right)^2, \quad 0 < \varepsilon < 1 \quad (2)$$

В этом случае вторичные максимумы имеют большую интенсивность по сравнению с интенсивностью для круглой апертуры. А значение последующих радиусов минимумов и максимумов уменьшается (рис. 2).



**Рисунок 2.** График функций нормированного распределения интенсивности для круглой и кольцевой апертуры.

Размер спекла можно определить как ширину центрального максимума функции Бесселя в выражении для автокорреляционной функции спеклов в пространстве изображения [1,2,12,14]. Ширина функции автокорреляции принимается равной полуширине интенсивностями центрального пятна дифракционной картины. Это расстояние и принимается за характерный

поперечный размер индивидуального единичного спекла в спекл-картине [1,2]. Для круговой апертуры значение первого минимума интенсивности, то есть функции Бесселя первого порядка  $J_1$  определяется хорошо известным выражением  $w = 0.61\lambda/a$  [1,5,12]. Тогда, характерный поперечный размер индивидуального одиночного спекла согласно уравнению (1) определяется следующим выражением:

$$d_{cn} = 1,22\lambda l_2 / D, \quad (3)$$

где  $D = 2a$  – диаметр линзы, формирующей изображение;  $l_2$  – расстояние до плоскости изображения объекта.

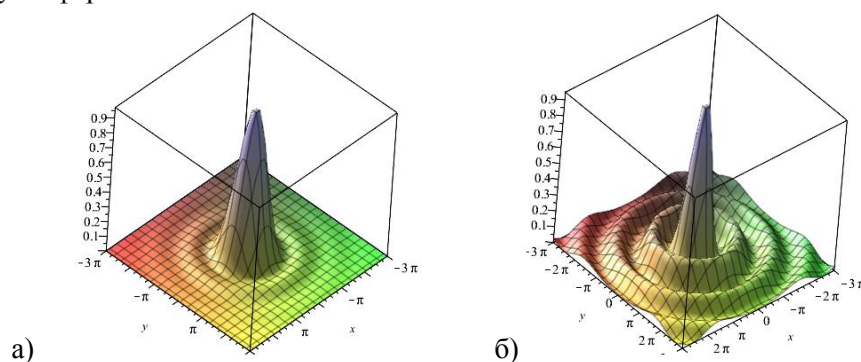
Из анализа выражения (2) следует, что при использовании кольцевой апертуры дифракционное поле в плоскости фотопластинки описывается разностью функций Бесселя первого порядка  $J_1$  в отличие от обычной круговой апертуры, при которой дифракционное поле в плоскости фотопластинки определяется только функцией Бесселя первого порядка  $J_1$ . Размер дифракционного гало зависит от размеров кольца. В таблице 1 приведены вычисленные значения минимумов уравнения (2) в зависимости от  $\varepsilon$ .

**Таблица 1.** Численные значения первых трех минимумов.

$\varepsilon$	$(k\varepsilon aw)_1$	$(k\varepsilon aw)_2$	$(k\varepsilon aw)_3$
<b>0,00</b>	3,832	7,016	10,173
<b>0,70</b>	2,8	6,49	10,08
<b>0,804</b>	2,68	6,1	9,61
<b>0,874</b>	2,57	5,88	9,25
<b>0,90</b>	2,53	5,81	9,09

Как следует из таблицы 1, при увеличении  $\varepsilon$ , значение минимумов уменьшается и их положение приближается к центральному максимуму.

На рисунке 3 представлены результаты численного моделирования пространственного распределения интенсивности при дифракции на круглой (а) и на кольцевой апертуре (б) в области Фраунгофера.

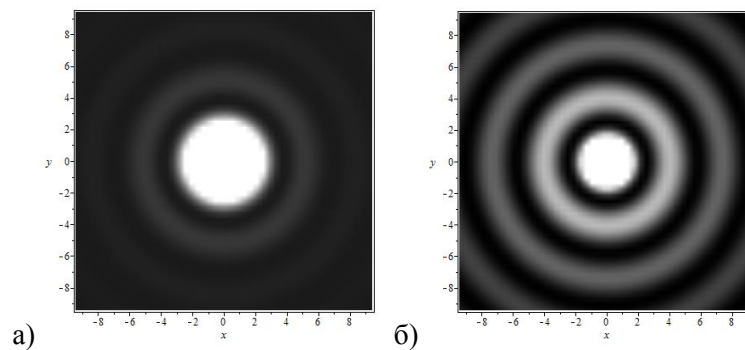


**Рисунок 3.** Пространственное распределение интенсивностей в области Фраунгофера: а) круглая апертура; б) кольцевая апертура.

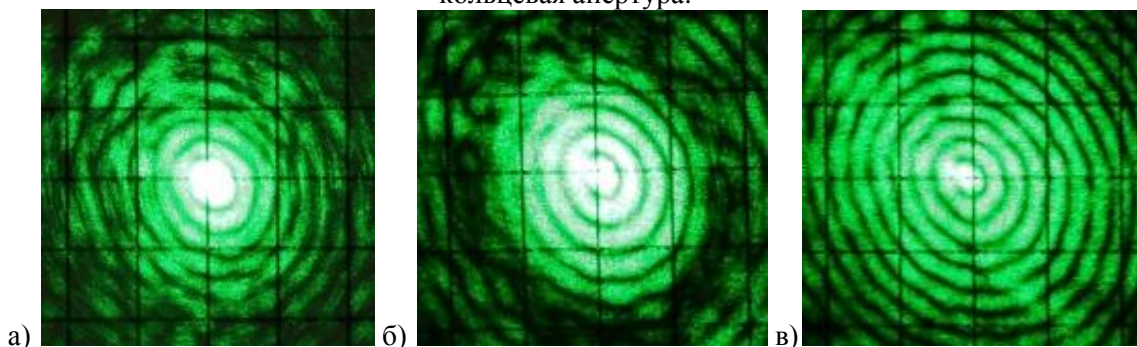
На рисунке 4 представлены результаты численного моделирования типичной дифракционной картины наблюдаемой на экране при дифракции на круглой (а) и на кольцевой апертуре (б) в области Фраунгофера.

Из рисунков 3 и 4 видно, что при кольцевой апертуре происходит сужение диска Эйри и, следовательно, к уменьшению характерного поперечного размера индивидуального одиночного спекла.

На рисунке 5 представлены фотографии экспериментальных исследований по изменению дифракционных картин в зависимости от типа апертуры.



**Рисунок 4.** Дифракционная картина на экране в области Фраунгофера: а) круглая апертура; б) кольцевая апертура.



**Рисунок 5.** Экспериментальные дифракционные картины в области Фраунгофера: а) круглое отверстие диаметром 3 мм; б) кольцообразное отверстие –  $\varepsilon = 0,7$ ; в)  $\varepsilon = 0,9$ .

В таблице 2 приведены экспериментальные значения минимумов на дифракционной картине в зависимости от  $\varepsilon$ .

**Таблица 2.** Экспериментальные значения первых трех корней.

$\varepsilon$	$(k\varepsilon aw)_1$	$(k\varepsilon aw)_2$	$(k\varepsilon aw)_3$
<b>0,00</b>	3,80	7,04	9,97
<b>0,70</b>	2,86	6,43	9,90
<b>0,80</b>	2,51	6,01	9,43
<b>0,87</b>	2,43	5,67	9,05
<b>0,90</b>	2,35	5,60	8,69

Экспериментальные исследования проводились на круглом отверстии диаметром 3 мм. В экспериментах использовался лазер с длиной волны света 0,532 мкм. Экспериментальные результаты (Рис. 5, Таблица 2) полностью согласуются с теоретическими данными (Рис. 3 и 4, Таблица 1).

Таким образом, при использовании кольцевой апертуры характерный поперечный размер индивидуального одиночного спекла, согласно уравнению (2), будет зависеть от величины  $\varepsilon$ .

### 3. Заключение

Использование кольцевой апертуры в спекл-фотографии, как показано выше, приводит к уменьшению характерного поперечного размера одиночного спекла. Так при использовании кольцевой апертуры с  $\varepsilon = 0,9$ , характерный поперечный размер одиночного спекла уменьшается в 1,5 раза по сравнению с круглой апертурой, а это ведет также к повышению в 1,5 раза чувствительности при определении перемещений методом спекл-фотографии. Следует также отметить, что в этом случае также снижаются требования к качеству оптики, так как позволяет снизить влияние aberrаций на процесс формирования изображения и, следовательно, повысить разрешающую способность оптической системы согласно критерию Рэля. На рисунке 6

представлено распределение интенсивности в фокальной плоскости оптической системы для круглой и кольцевой апертур.

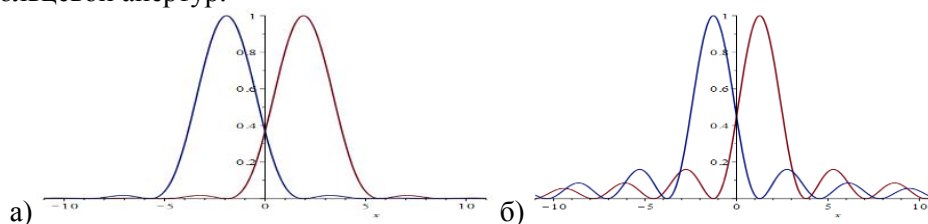


Рисунок 6. Критерий Рэлея: а) круглая апертура; б) кольцевая апертура –  $\varepsilon = 0,9$ .

#### 4. Литература

- [1] Клименко, И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия / И.С. Клименко. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985. – 224 с.
- [2] Франсон, М. Оптика спеклов / М. Франсон. – М.: Мир, 1980. – 171 с.
- [3] Sirohi, R.S. Optical Methods of Measurement: wholefield techniques / R.S. Sirohi. – New York: CRC Press, 2009. – 290 p.
- [4] Франсон, М. Когерентность в оптике / М. Франсон, С. Сланский. – М.: Наука, 1967. – 80 с.
- [5] Schnars, U. Digital Holography / U. Schnars, W. Jueptner. – Berlin: Springer, 2005. – 164 p.
- [6] Стафеев, С.К. Основы оптики / С.К. Стафеев, К.К. Боярский, Г.Л. Башнина. – СПб.: Питер, 2006. – 336 с.
- [7] Бутиков, Е.И. Оптика / Е.И. Бутиков. – СПб.: Невский Диалект, БХВ-Петербург, 2003. – 480 с.
- [8] Мысина, Н.Ю. Особенности статистического распределения разности фаз в спекл-поле: численный и натурный эксперименты / Н.Ю. Мысина, Л.А. Максимова, Б.Б. Горбатенко, В.П. Рябухо // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 4. – С. 451-463.
- [9] Горбатенко, Б.Б. Реконструкция изображения по пространственному распределению интенсивности дифракционного спекл-модулированного поля / Б.Б. Горбатенко, Л.А. Максимова, В.П. Рябухо, Ю.В. Норов // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 31, № 2. – С. 26-33.
- [10] Горбатенко, Б.Б. Пространственный спектр (дифракционное гало) фурье-спеклограммы рассеивающего объекта / Б.Б. Горбатенко, А.А. Гребенюк, Л.А. Максимова, В.П. Рябухо // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, № 4. – С. 43-51.
- [11] Осипов, М.Н. Применение кольцевой апертурной диафрагмы в спекл-интерферометрии / М.Н. Осипов, М.Ю. Шапошников // Компьютерная оптика. – 2002. – Т. 24. – С. 110-113.
- [12] Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
- [13] Гудмен, Дж. Введение в фурье оптику / Дж. Гудмен. – М.: Мир, 1970. – 364 с.
- [14] Джоунс, Р. Голографическая и спекл-интерферометрия / Р. Джоунс, К. Уайкс. – М.: Мир, 1986. – 328 с.
- [15] Osipov, M.N. Digital speckle photography with the ring aperture diaphragm / M.N. Osipov, R.N. Sergeev // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 201. – P. 155-163.

#### Благодарности

Исследования были проведены при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-08-00571-а, а также по Программе поддержки технического образования Фонда Арконик номер гранта: 18-17с.

## Research the behavior of subjective speckles depending on the type of entrance aperture

M.N. Osipov<sup>1</sup>, R.N. Sergeev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

<sup>2</sup>JSC SRC "Progress", Zemetsa street 18, Samara, Russia, 443009

**Abstract.** The paper presents the results of a research showing the possibility of reducing the size of speckles to increase the sensitivity and accuracy of the measuring system based on the use of methods of speckle photography and speckle interferometry. The theoretical and experimental results of the simulation of a single speckle are presented.