

## ГЕНЕРАЦИЯ И АНАЛИЗ МОДОВЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ С ПОМОЩЬЮ МНОГОПОРЯДКОВЫХ ДОЭ, СОГЛАСОВАННЫХ С МОДАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ФУНКЦИЯМИ ЦЕРНИКЕ

© 2010 С.В. Карпеев<sup>2</sup>, С.Н. Хонина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup>Институт систем обработки изображений РАН

На тестовых световых полях, содержащих угловые гармоники и моды Гаусса-Эрмита, проведено моделирование работы оптической системы, содержащей многопорядковые ДОЭ, согласованные с функциями Цернике. Проведено исследование устойчивости системы к различным отклонениям условий эксперимента от идеальных. Проведено качественное сравнение результатов моделирования и натурального эксперимента.

*Фазовый многопорядковый фильтр Цернике, натурные эксперименты, разложение гауссовых мод, угловые гармоники.*

### Введение

Очень близкой к задаче генерации световых полей является задача их анализа, в частности, разложения по некоторому ортогональному базису. Если спектральное разложение можно выполнять с помощью сферической линзы, то для других базисов в классической оптике не существует соответствующих приборов. Поэтому создание дифракционных оптических элементов (ДОЭ), выполняющих разложение по заданным ортогональным функциям, является актуальной задачей [1, 2].

В задаче инвариантного к повороту анализа световых полей целесообразно использовать пространственные фильтры, разделяющие когерентное световое поле на отдельные дифракционные составляющие специальных ортогональных базисов, содержащих угловые гармоники. Под угловыми гармониками понимаются комплексные функции с единичным модулем и линейной зависимостью от полярного угла  $\exp(im)$  [3, 4]. Такие гармоники появляются, например, в Бессель-оптике при оптическом выполнении преобразования Ханкеля высшего порядка, или при генерации бесселевых или гауссовых мод. Многоканальный ДОЭ, согласо-

ванный с такими модами, может использоваться как генератор этих мод в различных дифракционных порядках [5-7].

В данной работе с помощью фазового многопорядкового пространственного фильтра анализируются лазерные пучки на основе разложения поля по базису ортогональных круговых полиномов Цернике [8]. Сферическая линза фактически играет роль Фурье-анализатора, так как она разлагает световое поле на плоские волны или пространственные Фурье-гармоники. Аналогично, комбинация "линза+ДОЭ" может быть названа Цернике-анализатором если данный оптический элемент раскладывает лазерный свет по базису функций Цернике [9].

Разложение Цернике удобно использовать при инвариантном к повороту распознавании изображений, так как поворот анализируемого изображения не приведет к изменению экспериментально измеренных модулей коэффициентов [10]. Свойство инвариантности базиса функций Цернике связано с факторизацией этих функций на радиальную и угловую составляющие, причем последняя имеет вид угловых гармоник.

На тестовых световых полях, содержащих угловые гармоники и моды Гаусса-Эрмита, проведено моделирование работы

оптической системы, содержащей много-порядковые ДОЭ, согласованные с функциями Цернике при различных отклонениях условий эксперимента от идеальных, и проведено качественное сравнение результатов моделирования и натурального эксперимента.

**1. Многопорядковый дифракционный оптический элемент, согласованный с функциями Цернике**

Существует полное множество ортогональных функций с угловыми гармониками в круге радиуса R. Это круговые полиномы Цернике [8]:

$$\Psi_{nm}(r, \varphi) = \sqrt{\frac{n+1}{R^2}} R_n^m(r) \exp(im\varphi), \quad (1)$$

где

$$R_n^m(r) = \sum_{p=0}^{(n-m)/2} (-1)^p (n-p)! \times \\ \times \left[ p! \left( \frac{n+m}{2} - p \right)! \left( \frac{n-m}{2} - p \right)! \right]^{-1} \left( \frac{r}{r_0} \right)^{n-2p}$$

– радиальные полиномы Цернике, удовлетворяющие следующим условиям:

$$R_n^{-m}(r) = R_n^m(r), \quad R_n^{\pm 1}(r_0) = 0, \\ R_{2k+1}^{2l}(r) = 0, \quad R_{2k}^{2l+1}(r) = 0, \quad R_0^0(r) = 1,$$

причём,  $|m| \leq n$ ,  $n-m$  – чётное.

Разложение светового поля с комплексной амплитудой  $E(r, \varphi)$  в ряд по функциям записывается в виде

$$E(r, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n C_{nm} \Psi_{nm}(r, \varphi). \quad (2)$$

В плоскости пространственного Фурье-спектра, который может быть сформирован с помощью сферической линзы с фокусным расстоянием  $f$ , комплексную амплитуду светового поля  $F(\rho, \varphi) = \mathfrak{F}[E(r, \varphi)]$ , можно представить в виде разложения по функциям Цернике:

$$F(\rho, \varphi) = -\frac{2i}{fR\sqrt{\rho}} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \sqrt{n+1} (-i)^m \times \\ \times C_{nm} e^{im\varphi} \int_0^R R_n^m(r) J_m\left(\frac{2}{f}\rho r\right) r dr. \quad (3)$$

Интеграл берётся в явном виде:

$$W_{nm}(\rho) = \int_0^R R_n^m(r) J_m\left(\frac{2}{f}\rho r\right) r dr = \\ = (-1)^{(n-m)/2} R^2 J_{n+1}\left(\frac{2}{f}\rho R\right) \cdot \left(\frac{2}{f}\rho R\right)^{-1}. \quad (4)$$

Из уравнения видно, что при  $n > 0$  комплексная амплитуда в центральных точках  $\rho = 0$  равна нулю:

$$W_{nm}(\rho = 0) = \begin{cases} 0, & n > 0, \\ R^2/2, & n = 0. \end{cases}$$

Из последнего уравнения также следует, что дифракционные порядки, соответствующие базисным функциям с различными номерами  $m$ , но одинаковыми номерами  $n$ , будут иметь похожие дифракционные картины (кольцевые структуры при  $n > 0$ ) в Фурье-плоскости:

$$|W_{nm}(\rho)| = R^2 \left| J_{n+1}\left(\frac{2}{f}\rho R\right) \right| \cdot \left(\frac{2}{f}\rho R\right)^{-1}.$$

Заметим, что так как  $R_0^0(r) = 1$ , базис полиномов Цернике содержит единицу в качестве члена разложения. Это означает, что если осветить ДОЭ, согласованный с функциями Цернике плоской волной с амплитудой  $E(r, \varphi) = 1$ , окажется, что только один коэффициент разложения будет ненулевым:  $|C_{00}|^2 \neq 0$ . Появление ненулевых значений в других порядках будет означать обнаружение соответствующих аберраций.

ДОЭ, формирующие несколько модовых пучков в разных дифракционных порядках, применяются как пространственные фильтры для анализа поперечного модового состава света и для одновременного ввода света в набор волокон.

Если ДОЭ, у которого функция пропускания представлена в виде линейной

комбинации ограниченного числа базисных функций  $\Psi_{nm}(x, y)$  с различными несущими пространственными частотами:

$$(x, y) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M \Psi_{nm}^*(x, y) \exp[i(\dots x + \dots y)], \quad (5)$$

совмещён со сферической линзой и освещён световой волной  $W(x, y)$ , то интенсивность света в заданных точках фокальной плоскости с пространственными частотами  $(\dots, \dots)$  будет приближённо пропорциональна квадратам модулей коэффициентов разложения  $w_{nm}$  светового поля по этому базису:

$$w(x, y) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M w_{nm} \Psi_{nm}(x, y). \quad (6)$$

При освещении ДОЭ с комплексной функцией пропускания (1) плоской волной в спектральной плоскости линзы в каждом дифракционном порядке формируются Фурье-образы соответствующих базисных функций  $\Psi_{nm}(x, y)$ :

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{nm}^*(x, y) \exp[i(\dots x + \dots y)] \times \exp\left[-i \frac{2}{f}(ux + vy)\right] dx dy = \hat{\Psi}_{nm}^*\left(u - \frac{2}{f} \dots, v - \frac{2}{f} \dots\right), \quad (7)$$

где  $\hat{\Psi}_{nm}(u, v)$  – Фурье-образ функций  $\Psi_{nm}(x, y)$ .

## 2. Исследование устойчивости действия многопорядкового фильтра, согласованного с функциями Цернике, к погрешностям освещающего пучка

Перед проведением натуральных экспериментов с фильтром Цернике необходимо оценить требования к точности соблюдения внешних параметров эксперимента. Чаще всего встречаются отклонения, связанные с погрешностями освещающего пучка. В этом подразделе исследуется влияние отклонений размера и децентрирования освещающего пучка.

Параметры моделирования были выбраны следующие: 800 пикселей по радиусу  $r$  и 800 пикселей по углу  $\theta$ ,  $R = 1$  мм,  $\lambda = 633$  нм,  $f = 150$  мм. Итеративными методами [1,2] был рассчитан 20-канальный фазовый ДОЭ, согласованный с функциями Цернике с номерами  $(n, m)$ :  $n, m = \overline{0,5}$ .

На рис. 1 показаны результаты моделирования при точном соответствии освещающего пучка параметрам, заложенным при расчете ДОЭ. Показаны: полутонная фаза ДОЭ (рис. 1а), 20 дифракционных порядков, сформированных в частотной плоскости линзы (рис. 1б), и их соответствие номерам  $(n, m)$  (рис. 1в).

Из рис. 1 видно, что анализатор расщепляет падающий плоский пучок на 20 пучков, причем интенсивность в центральных точках всех порядков нулевая. Это означает, что освещающий волновой фронт не имеет аберраций.

Исследуем далее влияние отношения радиуса входного пятна  $R_1$  и радиуса фильтра Цернике  $R_2$ .

На рис. 2а видно, что при превышении радиуса пучка по отношению к радиусу фильтра качественных изменений в картине распределения интенсивности не происходит. Появляется лишь нулевой порядок, но в центрах остальных порядков по-прежнему нули. Существенно отличается случай, когда освещающий пучок покрывает фильтр не полностью. При этом появляется ненулевая интенсивность в центральных точках дифракционных порядков с номерами  $(2, 0)$  и  $(4, 0)$ . В результате дальнейшего уменьшения радиуса пучка большая часть энергии сосредоточивается в этих дифракционных порядках. Это явление можно интерпретировать как появление соответствующих аберраций волнового фронта.

Также исследовалось смещение центра освещающего пучка относительно центра фильтра Цернике. Моделировались два случая: малое и значительное смещение. В первом случае центр пучка был смещен на 0,125 мм, что соответству-

ет  $0,125 R_2$ . Во втором же случае, центр ет  $0,875 R_2$ .  
 был смещен на  $0,875$  мм, что соответству-

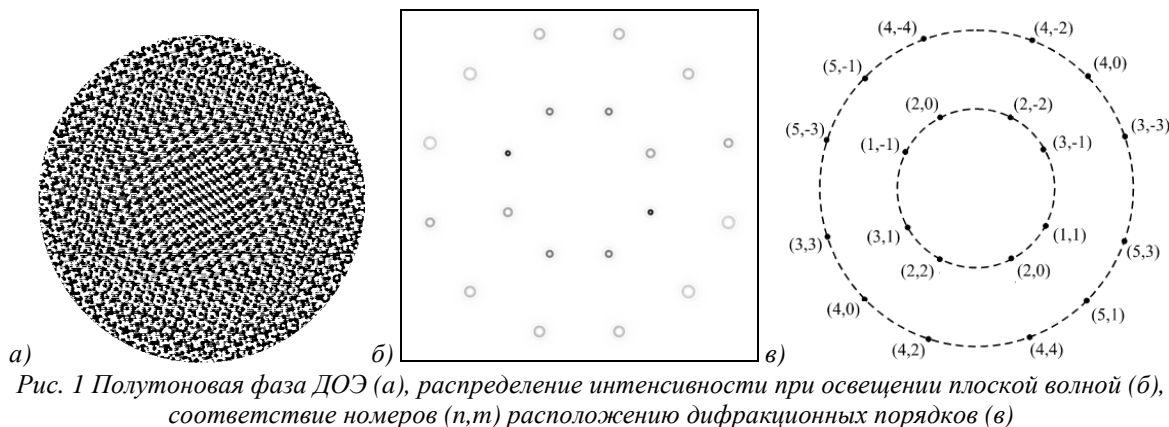


Рис. 1 Полутоновая фаза ДОО (а), распределение интенсивности при освещении плоской волной (б), соответствие номеров (n,m) расположению дифракционных порядков (в)

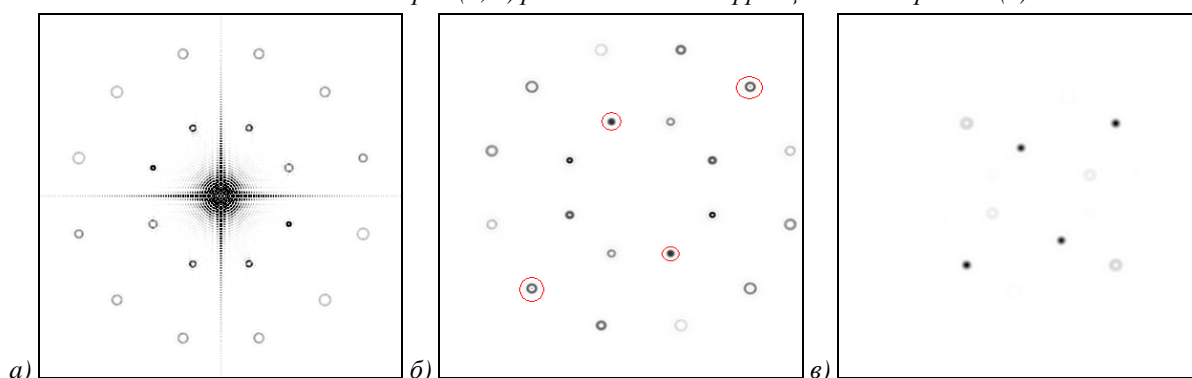


Рис. 2. Распределение интенсивности при  $R_1/R_2 = 1/\sqrt{2}$  (а), при уменьшении радиуса освещающего пучка на 15% от радиуса элемента (б), при дальнейшем уменьшении (в)

Легко заметить, что смещение центра освещающего пучка приводит к вырождению колец в точки. Образуются ложные пики в центрах дифракционных порядков. Также наблюдается зависимость степени вырождения от номера  $m$  дифракционного порядка. Чем меньше номер  $m$ , тем значительнее влияние смещения.

### 3. Сравнение результатов моделирования оптической системы с натурными экспериментами на тестовых световых полях

Рассчитанный многопорядковый фильтр, согласованный с функциями Цернике, был изготовлен по технологии электронной литографии с помощью травления полиметилметакрилата, нанесенного на подложку из кварцевого стекла. Изготовленный оптический элемент имеет бинарный рельеф высотой  $690$  нм, что является почти оптимальной высотой для плавленого кварца (матери-

ал подложки  $n = 1,46$ ) при использовании освещающего излучения с длиной волны  $\lambda = 632,8$  нм. Диаметр ДОО  $4,8$  мм, шаг дискретизации  $3$  мкм.

В первой серии натурных экспериментов исследовалось оптическое разложение световых пучков мод Гаусса-Эрмита (ГЭ) и их суперпозиций по базису функций Цернике. Для формирования мод и суперпозиций ГЭ использовались частично кодированные ДОО, реализующие соответствующие моды [11]. Такие ДОО формируют моды ГЭ в нулевом порядке дифракции, причем точность формирования повышается с ростом расстояния, на котором формируется мода и достигает максимума в дальней зоне дифракции. Однако эксперименты показывают, что приемлемая точность достигается уже на расстояниях в  $100 - 150$  мм при размере фильтра около  $4,8$  мм. На рис. 4 приведены фазовые функции использовавшихся фильтров.

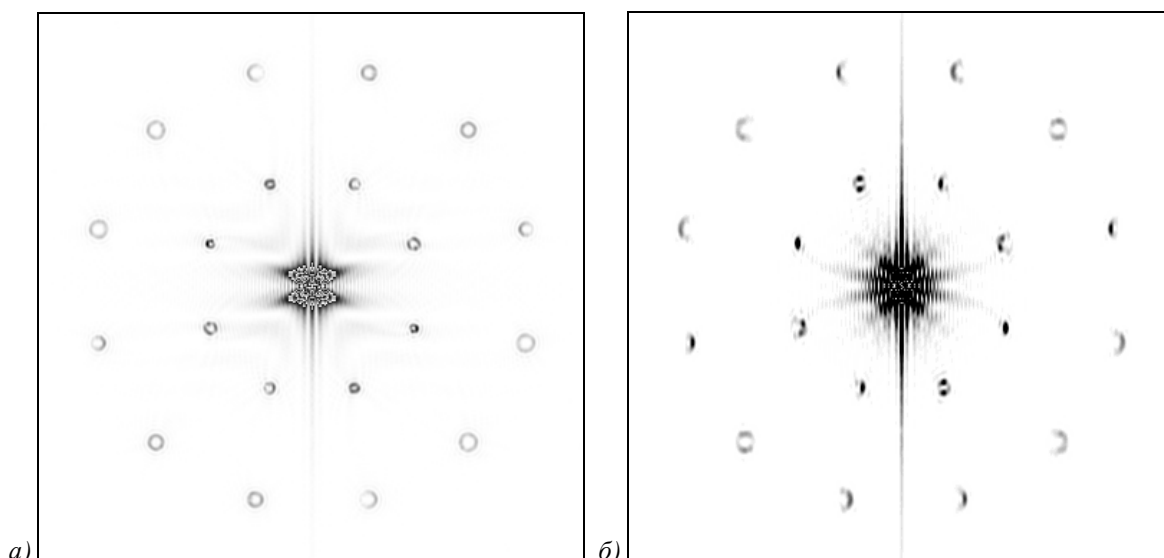


Рис. 3. Распределения интенсивности при смещении на  $0,125 R_2$  (а) и на  $0,875 R_2$  (б)

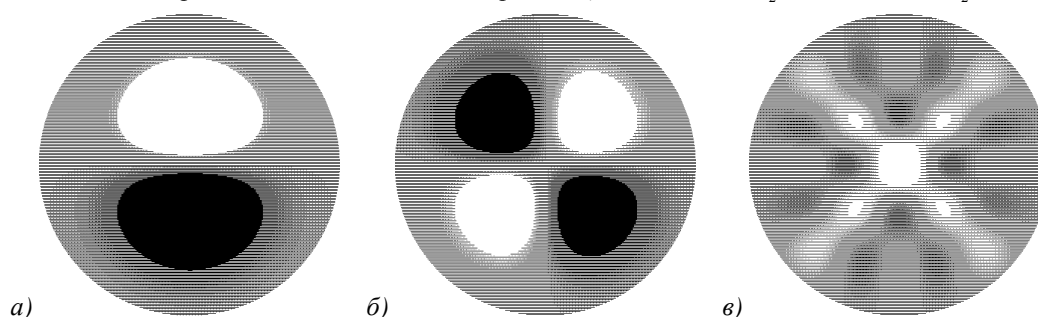


Рис. 4. Фазовые функции ДООЭ для формирования мод ГЭ:  $(1,0)$  (а),  $(1,1)$  (б),  $(0,0)+(2,2)+(4,4)$  (в)

С учётом вышесказанного была собрана оптическая схема эксперимента, показанная на рис. 5.

Использовался гелий-неоновый лазер ЛГН-215. Расширитель пучка включал  $8\times$  микрообъектив, диафрагму  $50\text{ мкм}$  и коллимирующий объектив с фокусным расстоянием  $150\text{ мм}$ . ДООЭ1 служит для формирования моды ГЭ, а ДООЭ2 – анализатор Цернике. Фокусное расстояние Фурье-объектива  $300\text{ мм}$ . Размер пиксела ПЗС-камеры Videoscan VS-54 около  $4\times 6\text{ мкм}$ . Экспериментальные исследования показали, что расстояние  $d = 150\text{ мм}$  вполне достаточно для формирования моды, и при увеличении расстояния никаких существенных изменений не происходит. На приводимых далее рисунках показаны промоделированные расчетные и экспериментальные распределения интенсивности, полученные с модами ГЭ  $(1,0)$ ,  $(1,1)$  и суперпозицией  $(0,0) + (2,2) + (4,4)$ , а также сечения

распределений интенсивности в некоторых дифракционных порядках. На этом рисунке и далее на всех рисунках, относящихся к модам ГЭ, экспериментальные распределения интенсивности получены при повороте фильтра Цернике на  $45^\circ$  и зеркальном отображении картины относительно промоделированных распределений интенсивности. Это, как видно из картин, не привело к изменению распределений интенсивности в дифракционных порядках, что подтверждает инвариантность данного фильтра к вращению.

На рис. 6 видно, что максимумы в порядках с номерами  $(1,1)$  и  $(1,-1)$  возникают как на расчетных, так и на экспериментальных распределениях интенсивности. Однако на экспериментальных распределениях имеется нулевой порядок. Как было установлено выше (рис. 2), это происходит вследствие большего, чем фильтр, размера анализируемого пучка. Кроме того, имеются бо-

лее заметные, чем в расчёте, максимумы в порядках (3, -1) и (3, 1), что можно объяснить достижением насыщения в порядках (1, 1) и (1, -1) (видно на сечениях распределений интенсивности). В остальных же порядках существенных отклонений от расчёта нет.

На рис. 7 приведены аналогичные распределения для моды ГЭ (1, 1). Здесь мы также видим хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных. Только порядки со вторым индексом -2 реагируют на моду ГЭ (1, 1), причём соотношение высоты пиков в центре соот-

ветствующих распределений на этот раз близко к расчётному.

С целью экспериментальной проверки свойства инвариантности к вращению фильтра Цернике аналогичные распределения были получены при повороте входного пучка на 45° (рис. 8). Виден синхронный поворот распределений интенсивности во всех дифракционных порядках, но интенсивности в центрах порядков (2, -2) и (4, -2), а именно они подлежат измерению, остаются неизменными.

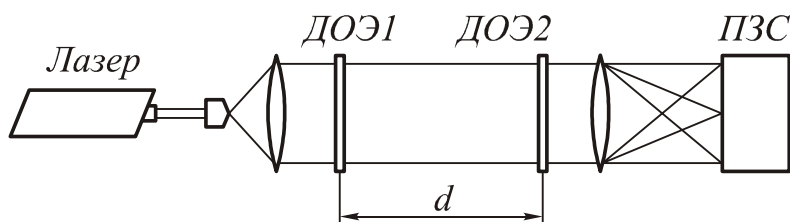


Рис. 5. Оптическая схема для исследования мод ГЭ, формируемых в нулевом порядке

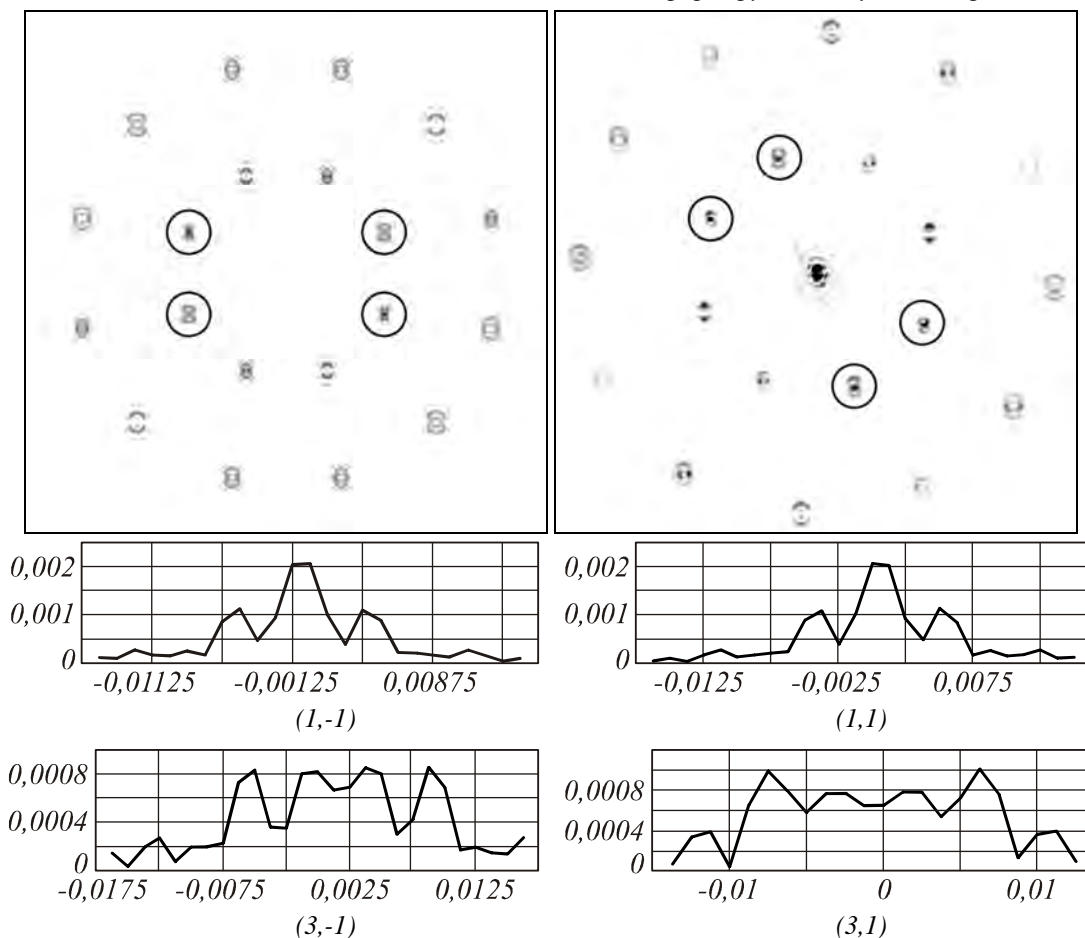


Рис. 6. Расчётное (слева) и экспериментальное (справа) распределение интенсивности в Фурье-плоскости при освещении 20-канального фильтра Цернике пучком, согласованным с модой ГЭ (0,1), а также экспериментальные сечения интенсивности некоторых дифракционных порядков

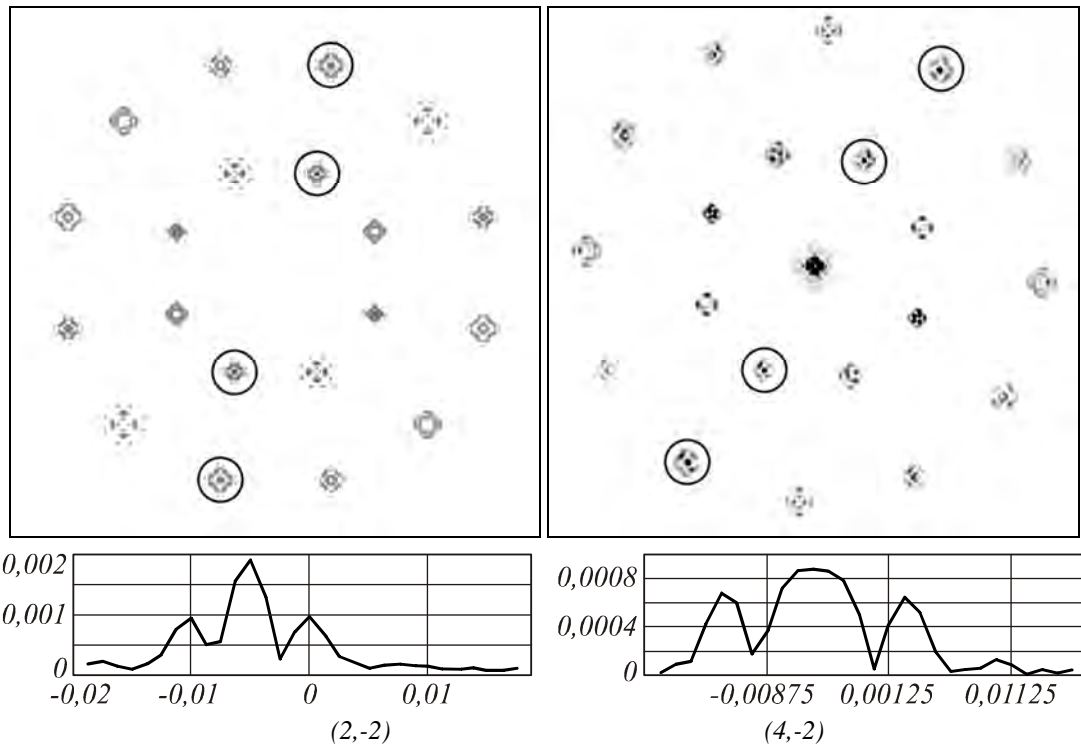


Рис. 7. Расчётное (слева) и экспериментальное (справа) распределение интенсивности в Фурье-плоскости при освещении 20-канального фильтра Цернике пучком, согласованным с модой ГЭ (1,1), а также экспериментальные сечения интенсивности некоторых дифракционных порядков

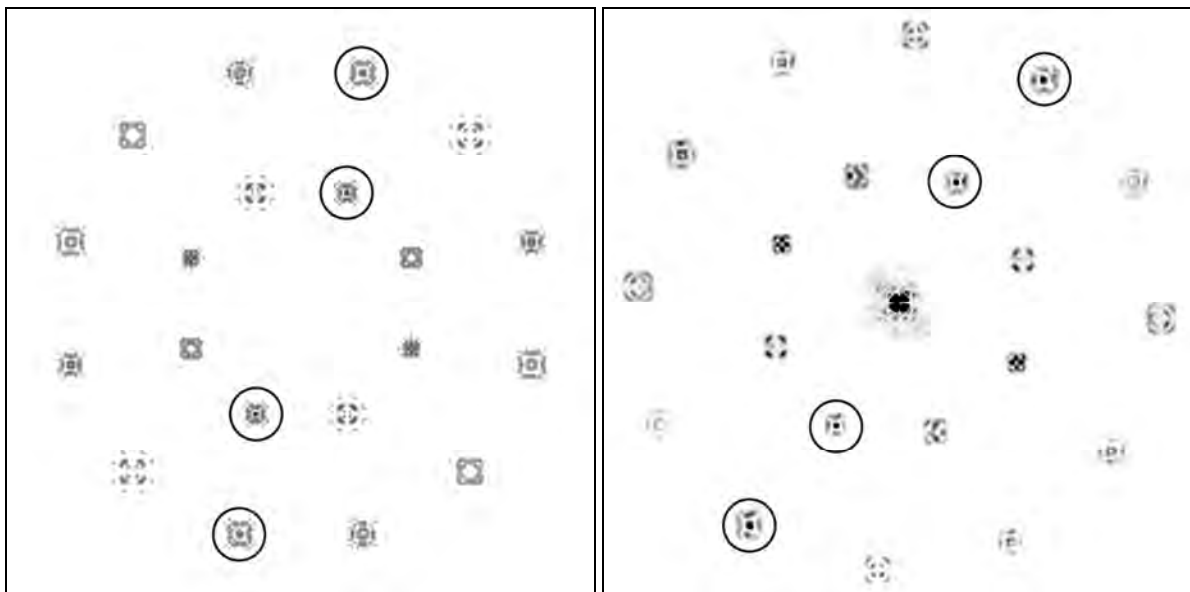


Рис. 8. Расчётное (слева) и экспериментальное (справа) распределение интенсивности в Фурье-плоскости при освещении 20-канального фильтра Цернике плоским пучком, согласованным с модой ГЭ (1,1), повернутой на  $45^\circ$

На рис. 9, 10 показаны результаты оптического разложения трёхмодового пучка, содержащего моды ГЭ (0, 0) + (2, 2) + (4, 4) по функциям Цернике. Присутствуют все четыре корреляционных пика, предсказываемых расчётом,

а именно в порядках (4, 4), (4, -4) и в обоих порядках (2, 0). Поворот входного пучка на  $45^\circ$  приводит к аналогичным предыдущему случаю последствиям. Таким образом, 20-канальный фильтр Цернике инвариантен к повороту на  $45^\circ$  при

взаимодействии с пучками, согласованными с модами Гаусса-Эрмита и их суперпозициями.

#### 4. Моделирование и экспериментальное исследование оптической системы при входном пучке, согласованном с вихревыми модами

В задаче распознавания изображений инвариантных к их повороту в плоскости наблюдения целесообразно использовать пространственные фильтры, разделяющие когерентное световое поле на отдельные дифракционные составляющие специальных ортогональных базисов, содержащих угловые гармоники (УГ). УГ описывает сингулярность фазы волнового фронта, т.к. при обходе вокруг центра полярной системы координат фаза приобретает набег, равный  $2\pi m$ ,  $m$  - номер УГ. Световые поля, содержащие УГ, обладают орбитальным угловым моментом и могут быть использованы для вращения захваченных в световой пучок микрочастиц [13, 14].

Отдельные УГ удобно формировать с помощью фазового ДОЭ в разных порядках дифракции. Фазовая маска одного из таких ДОЭ и результат его действия при освещении плоским пучком приведены на рис. 11.

При анализе световых пучков, распространяющихся под некоторыми углами к оптической оси, в натурном эксперименте требуется небольшая модификация оптической схемы, показанная на рис. 12. Отличием такой схемы от показанной на рис. 5 является подвижное крепление ДОЭ, согласованного с функциями Цернике (ДОЭ2). ДОЭ1 формирует набор УГ в разных частях выходной плоскости, а ДОЭ2 путем перемещения может быть совмещен с любой из них. Такой вариант схемы является более удобным, чем показанный на рис. 5, поскольку отпадает необходимость в смене формирующих фильтров. Результаты вычислительных и натуральных экспериментов по оптическому разложению световых полей, содержащих угловые гармоники с помощью 20-канального ДОЭ, согласованного с функциями Цернике, приведены далее на рис. 13, 14.

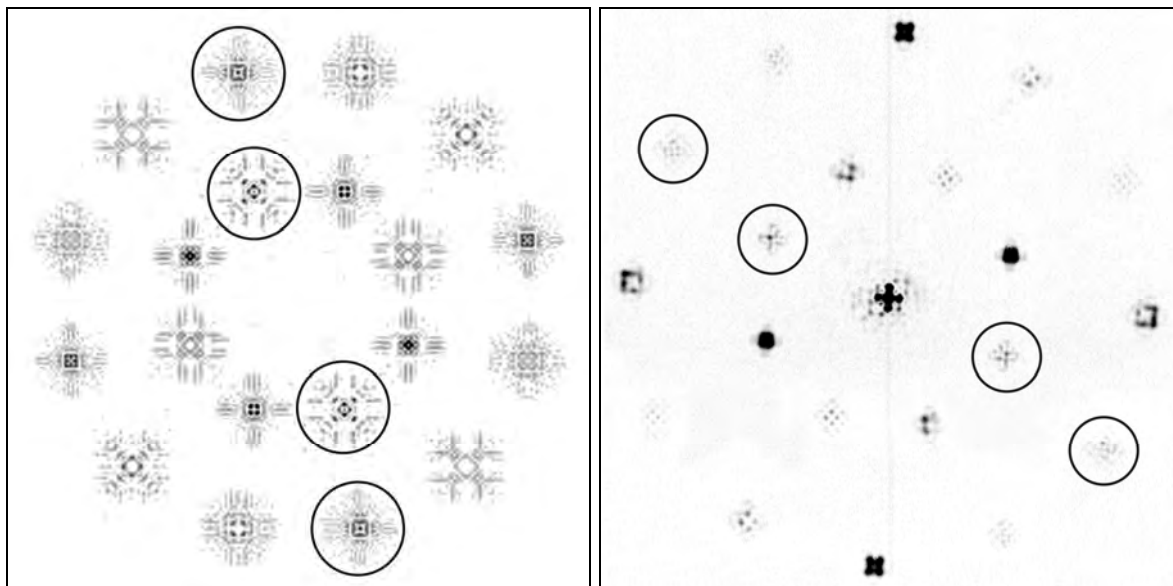


Рис. 9. Расчётное (слева) и экспериментальное (справа) распределение интенсивности в Фурье-плоскости при освещении 20-канального фильтра Цернике пучком, согласованным с суперпозицией мод ГЭ  $(0,0)(2,2),(4,4)$



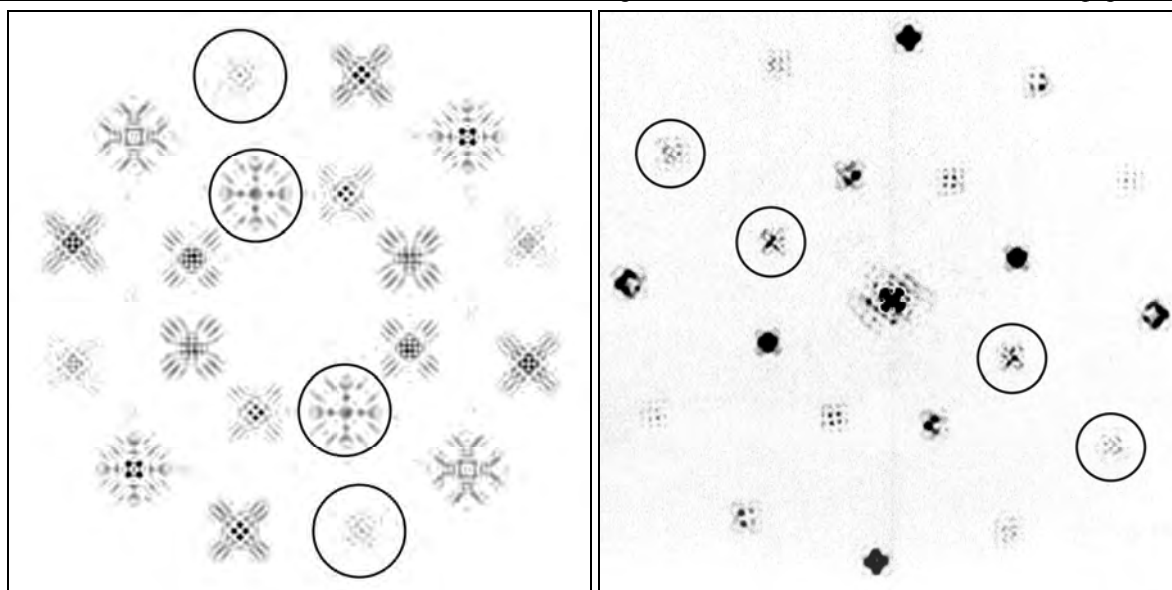


Рис. 10. Расчётное (слева) и экспериментальное (справа) распределение интенсивности в Фурье-плоскости при освещении 20-канального фильтра Цернике пучком, согласованным с суперпозицией мод ГЭ (0,0)(2,2),(4,4), повернутой на 45°

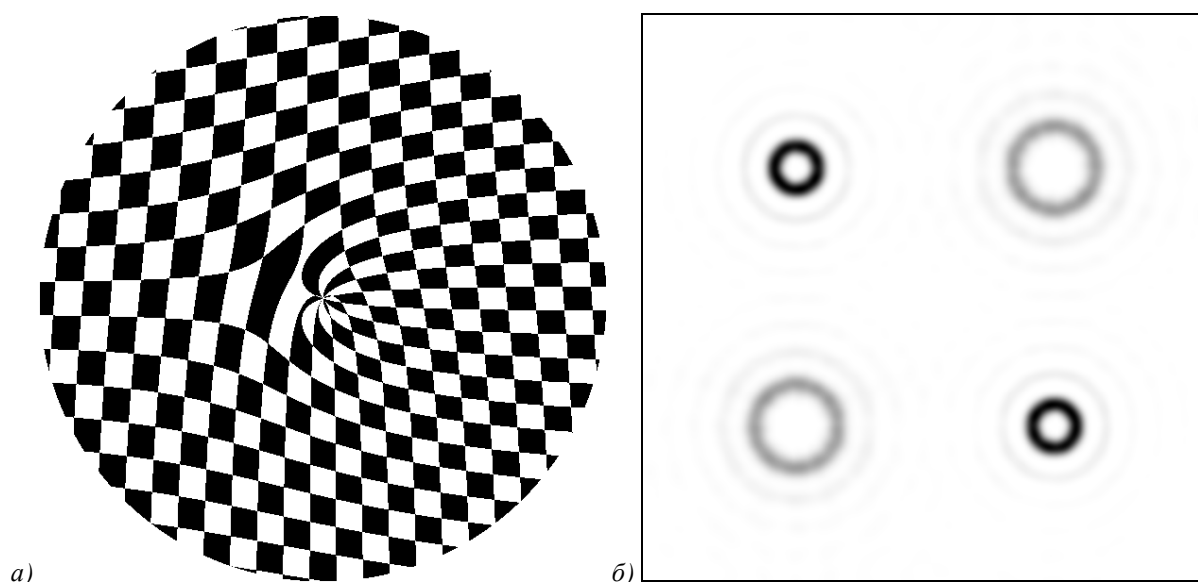


Рис. 11. Фазовая маска ДОО для формирования различных УГ в разных порядках дифракции (а) и сформированное им поле интенсивности (б)

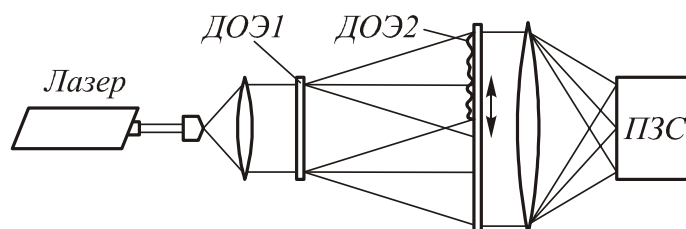


Рис. 12. Оптическая схема установки для анализа угловых гармоник, формируемых в различных порядках дифракции

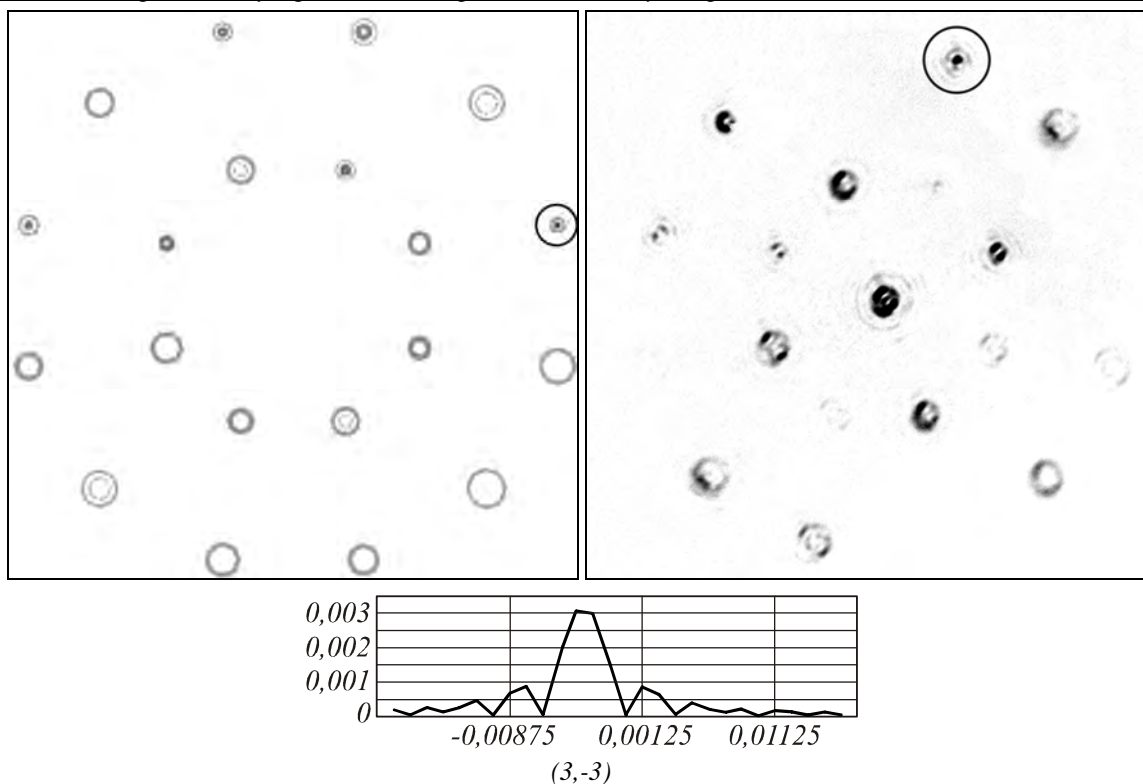


Рис. 13. Расчётное (слева) и экспериментальное (справа) распределение интенсивности в Фурье-плоскости при освещении 20-канального фильтра Цернике пучком, содержащим угловую гармонику с  $t=3$ , а также расчетное сечение интенсивности дифракционного порядка (3,-3)

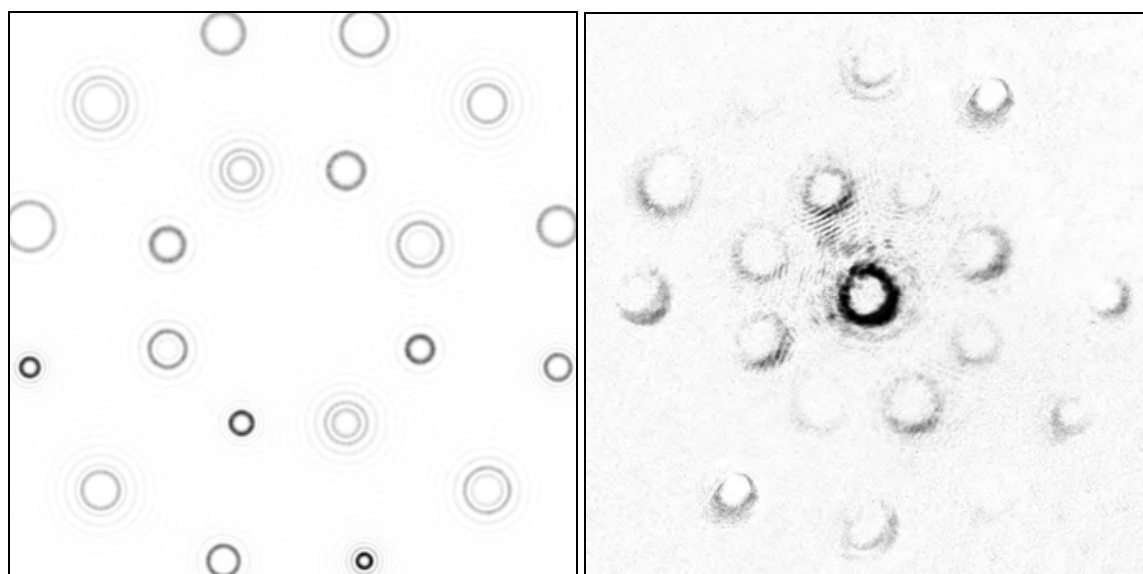


Рис. 14. Расчётное (слева) и экспериментальное (справа) распределение интенсивности в Фурье-плоскости при освещении 20-канального фильтра Цернике пучком, содержащим гармонику 7

На рис. 13 видно, что интенсивность не нулевая в центральной точке единственного дифракционного порядка с номером (3, -3), что соответствует сопряжённому значению номера гармоники. Экспериментальная картина повернута относительно промоделированной на  $45^\circ$ . Пово-

рот фильтра на  $45^\circ$  к качественным изменениям в распределении интенсивности не приводит. Таким образом, имеется качественное согласие теории и эксперимента.

Результаты эксперимента для гармоники 7 приведены на рис. 14.

Здесь также видно качественное согласие теории и эксперимента. Корреляционных пиков нет, т.к. порядки с  $m = 7$  в 20-канальном ДОЭ отсутствуют.

### Заключение

Исследована качественная зависимость поведения оптической системы, состоящей из 20-канального фильтра Цернике и линзы при отклонении от идеальных условий. Обнаружено, что данная система работоспособна при превышении размера пучка по сравнению с идеальным, но теряет работоспособность при уменьшении размера пучка. Также было показано, что данная система восприимчива к смещениям пучка относительно центра элемента.

Исследовано прохождение светового пучка, согласованного с модами ГЭ (0, 1), (1, 1), суперпозицией мод ГЭ (0, 0)+(2, 2)+(4, 4), а также УГ (3) и (7). Было показано, что данная система инвариантна к повороту. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF PG08-014-1), грантов РФФИ 10-07-00109-а, 10-07-00438-а и гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ НШ-7414.2010.9.

### Библиографический список

1. Методы компьютерной оптики [Текст] / под ред. В.А. Сойфера, издание 2-е, исправленное. Учебник. – М.: Физматлит, 2003. – 688 с.
2. Дифракционная компьютерная оптика [Текст] / под ред. В.А. Сойфера – М., Физматлит, 2007. – 736 с.
3. **Котляр, В.В.** Фазовый фильтр для селекции угловых гармоник [Текст] / В.В. Котляр, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2000. – Вып. 20. – С. 51-55.
4. **Хонина, С.Н.** Возбуждение и обнаружение угловых гармоник в волоконном световоде при помощи ДОЭ [Текст] /

С.Н. Хонина, С.В. Карпеев // Компьютерная оптика. – 2004. – Вып. 26. – С. 16-26.

5. **Котляр, В.В.** Фазовые дифракционные оптические элементы для одновременного формирования мод Гаусса-Лагерра в различных дифракционных порядках [Текст] / В.В. Котляр, П. Лаакконен, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, Я. Турунен, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 1999. – Вып. 19. – С. 107-111.

6. **Khonina, S.N.** Experimental selection of spatial Gauss-Laguerre modes [Text] / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, R.V. Skidanov, V.A. Soifer, P. Laakkonen, J. Turunen, Y. Wang // Optical Memory and Neural Networks (Allerton Press). – 2000. – V. 9(1). – P. 69-74.

7. **Koltyar, V.V.** Multi-order diffractive optical elements to process data [Text] / V.V. Koltyar, S.N. Khonina – in Book "Perspectives in Engineering Optics", Ed. by K. Singh, V.K. Rastogi – Publ. Anita Publications, Delhi, 2003. – P. 47-56.

8. **Born, M.** Principles of Optics [Text] / M. Born, E. Wolf – Pergamon Press, Oxford, 1968.

9. **Khonina, S.N.** Decomposition of a coherent light field using a phase Zernike filter [Text] / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, Y. Wang, D. Zhao // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. – 1998. – V. 3573. – P. 550-553.

10. **Khonina, S.N.** Diffractive optical element matched with Zernike basis [Text] / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, Ya. Wang, // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2001. – V. 11(2). – P. 442-445.

11. **Котляр, В.В.** Метод частичного кодирования для расчета фазовых формирователей мод Гаусса-Эрмита [Текст] / В.В. Котляр, С.Н. Хонина, В.А. Сойфер // Автометрия. – 1999. – № 6. – С. 74-83.

12. **Хонина, С.Н.** Экспериментальное формирование и селекция мод Гаусса-Эрмита с помощью ДОЭ [Текст] / С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2002. – Вып. 23. – С. 15-22.

13. **Khonina, S.N.** An analysis of the angular momentum of a light field in terms

of angular harmonics [Text] / Khonina S.N., Kotlyar V.V., Soifer V.A., Paakkonen P., Simonen J., Turunen J. // Journal of Modern optics. – 2001. – Vol. 48, No. 10. – PP. 1543-1557.

14. **Khonina, S.N.** DOE-generated laser beams with given orbital angular mo-

ment: application for micromanipulation [Text] / Khonina S.N., Skidanov R.V., Kotlyar V.V., Soifer V.A., Turunen J. // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. – 2005. – Vol. 5962. – PP. 59622W.

### References

1. Methods of Computer Optics // Ed. by V.A. Soifer, second, revised edition / Handbook, Moscow: Fizmatlit Publishers, 2003. – 688 p. – [in Russian].

2. Diffractive Computer Optics // Ed. by V.A. Soifer – Moscow: Fizmatlit Publishers, 2007. – 736 p. – [in Russian].

3. **Kotlyar, V.V.** A phase filter for selecting angular harmonics / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina // Computer Optics. – 2000. – V. 20. – P. 51-55. – [in Russian].

4. **Khonina, S.N.** Excitation and detecting angular harmonics in fiber waveguide using a DOE, / S.N. Khonina, S.V. Karpeev // Computer Optics. – 2004. – V. 26. – P. 16-26. – [in Russian].

5. **Kotlyar, V.V.** Phase diffractive optical elements for simultaneously generating Laguerre-Gaussian modes in different diffraction orders / V.V. Kotlyar, P. Laakkonen, R.V. Skidanov, V.A. Soifer, J. Turunen, S.N. Khonina // Computer Optics. – 1999. – V. 19. – P. 107-111. – [in Russian].

6. **Khonina, S.N.** Experimental selection of spatial Gauss-Laguerre modes / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, R.V. Skidanov, V.A. Soifer, P. Laakkonen, J. Turunen, Y. Wang // Optical Memory and Neural Networks (Allerton Press). – 2000. – V. 9(1). – P. 69-74.

7. **Kotlyar, V.V.** Multi-order diffractive optical elements to process data / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina – in Book "Perspectives in Engineering Optics", Ed. by K. Singh, V.K. Rastogi – Publ. Anita Publications, Delhi, 2003. – P. 47-56.

8. **Born, M.** Principles of Optics / M. Born, E. Wolf – Pergamon Press, Oxford, 1968.

9. **Khonina, S.N.** Decomposition of a coherent light field using a phase Zernike filter, / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, Y. Wang, D. Zhao // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. – 1998. – V. 3573. – P. 550-553.

10. **Khonina, S.N.** Diffractive optical element matched with Zernike basis / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, Ya. Wang, // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2001. – V. 11(2). – P. 442-445.

11. **Kotlyar, V.V.** A partial encoding technique to design phase shapers for generating Hermite-Gaussian modes / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // Avtometriya. – 1999. – V. 6. – P. 74 -83. – [in Russian].

12. **Khonina, S.N.** Experimental generation and selection of Hermite-Gaussian modes using a DOE / S.N. Khonina // Computer Optics. – 2002. – V. 23. – P. 15-22. – [in Russian].

13. **Khonina, S.N.** An analysis of the angular momentum of a light field in terms of angular harmonics / Khonina S.N., Kotlyar V.V., Soifer V.A., Paakkonen P., Simonen J., Turunen J. // Journal of Modern optics. – 2001. – Vol. 48, No. 10. – PP. 1543-1557.

14. **Khonina, S.N.** DOE-generated laser beams with given orbital angular moment: application for micromanipulation / Khonina S.N., Skidanov R.V., Kotlyar V.V., Soifer V.A., Turunen J. // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. – 2005. – Vol. 5962. – PP. 59622W.

## GENERATION AND ANALYSIS OF LIGHT MODES USING MULTI-ORDER DOES MATCHED WITH THE LASER MODES AND THE ZERNIKE FUNCTIONS

@ 2010 S.V. Karpeev<sup>2</sup>, S.N. Khonina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

<sup>2</sup> Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences

Using test light fields, we simulate the performance of an optical setup containing multi-order DOEs matched with the Zernike functions. The system tolerance to variations of the experiment conditions from the ideal is studied. A qualitative comparison of the simulation results and a natural experiment is made.

*Phase multi-order Zernike filter, natural experiments, Gaussian mode decomposition, angular harmonics.*

### Информация об авторах

**Карпеев Сергей Владимирович**, доктор физико-математических наук. Институт систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, модовые и поляризационные преобразования, волоконная оптика, оптическая обработка изображений. E-mail: [karp@smr.ru](mailto:karp@smr.ru).

**Хонина Светлана Николаевна**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры технической кибернетики. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: [khonina@smr.ru](mailto:khonina@smr.ru).

**Karpeev Sergei Vladimirovich**, doctor of physical and mathematical sciences. Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. Area of research: diffractive optics, mode and polarization transformations, optical and digital image processing. E-mail: [karp@smr.ru](mailto:karp@smr.ru).

**Khonina Svetlana Nikolaevna**, doctor of physical and mathematical sciences, professor. Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov. Area of research: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: [khonina@smr.ru](mailto:khonina@smr.ru).