

Многопорядковые оптические пространственные вихревые фильтры для одновременного выделения контуров различных частей объекта

С.Н. Хонина^{1,2}, А.П. Порфирьев^{1,2}, П.А. Хорин¹, А.П. Дзюба¹, Д.П. Серафимович^{1,2}, Р.В. Скиданов^{1,2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34;

² Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт», 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151

Аннотация

Проведено исследование преобразования анализируемого объекта набором из нескольких пространственных фильтров, включая полосовые, дифференциальные, радиальные и вихревые различных типов, а также фильтры Гильберта. Численно продемонстрированы преимущества и недостатки различных фильтров по четкости, инвариантности направления выделения краев, а также энергетической эффективности. На основе полученных результатов разработаны многопорядковые оптические пространственные вихревые фильтры для одновременного выделения контуров различных частей объекта. При этом показано, что многопорядковый фильтр позволяет в одной плоскости формировать набор картин с четко выделенным полным контуром, углами объекта и различными частями контура. Проведена численная и экспериментальная апробация 4- и 5-канальных пространственных вихревых фильтров различных типов на тестовых объектах. Показана возможность использования предложенных фильтров для одновременного выделения краёв всего изображения и различных частей изображения с целью извлечения большего числа особенностей из анализируемого изображения.

Ключевые слова: пространственная фильтрация, выделение краёв, многопорядковые оптические фильтры.

Цитирование: Хонина, С.Н. Многопорядковые оптические пространственные вихревые фильтры для одновременного выделения контуров различных частей объекта / С.Н. Хонина, А.П. Порфирьев, П.А. Хорин, А.П. Дзюба, Д.П. Серафимович, Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 4. – С. 525-534. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1497.

Citation: Khonina SN, Porfirev AP, Khorin PA, Dzyuba AP, Serafimovich DP, Skidanov RV. Multi-order optical spatial vortex filters for simultaneous contour extraction of various parts of an object. Computer Optics 2024; 48(4): 525-534. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1497.

Введение

Оптическая обработка даёт возможность с большой скоростью проводить параллельную обработку больших массивов информации в режиме реального времени [1, 2], что остаётся привлекательной характеристикой оптических вычислений, несмотря на определённые сложности преобразования оптико-цифровой информации [3–5].

Оптическая реализация таких математических операций, как свёртка и корреляция, легко осуществляется с использованием обычных линз, действие которых описывается преобразованием Фурье [6–10].

Оптическое преобразование Фурье (ОПФ) – мощный инструмент, широко используемый для преобразования оптических данных при условии когерентности излучения [11–13].

Манипулирование пространственными частотами двумерных изображений с помощью ОПФ хорошо изучено для таких приложений, как контрастирование, выделение контуров, распознавание объектов, криптография [14–24].

В частности, в работе [19] было продемонстрировано усиление контуров за счёт блокирования областей с низкой пространственной частотой.

Однако простой метод амплитудной пространственной фильтрации имеет некоторые недостатки. При изменении объекта будет меняться и пространственно-частотный спектр в плоскости Фурье.

Таким образом, каждый раз размер пространственного фильтра должен изменяться соответствующим образом и должен быть точно размещён по центру на плоскости Фурье.

Чтобы преодолеть эти трудности, исследователи разработали несколько методов нелинейной фильтрации для самоадаптирующихся вычислений в реальном времени. В качестве нелинейной среды используются органические и биологические молекулы, фоторефрактивные полимеры и жидкие кристаллы. Като и Гудман продемонстрировали логарифмическую фильтрацию, поместив полутонный контактный экран (периодический массив виньетированных точек на гибкой опоре) во входной плоскости когерентной оптической системы [25]. Спектр Фурье обрабатывается соответствующим пространственным фильтром и подвергается обратному преобразованию Фурье. Обработанное изображение отображает желаемую нелинейную функцию исходной интенсивности. Бабкина и соавторы использовали акустооптический модулятор в плоскости Фурье для выполнения про-

странственно-частотной фильтрации, когда акустическая волна в кристалле парателлурита образует решётку [26]. Когда падающий оптический луч взаимодействует с решёткой, свет дифрагирует в нулевой и первый порядок. При изменении частоты возбуждения модулятора в дифрагированном луче в реальном времени наблюдается эффект усиления краёв.

Гибридные методы обработки также предлагаются и демонстрируются в литературе, когда пространственные фильтры (созданные в цифровом виде на компьютере) отображаются на пространственном модуляторе света (ПМС), помещённом в фокусе плоскости для обработки в реальном времени [20, 21]. Такой гибридный метод обработки был применён для получения фазово-контрастных изображений живых биологических образцов [27].

Удобным подходом, не зависящим от размера пространственного спектра, является применение вихревых фазовых фильтров. Впервые вихревой пространственный фазовый фильтр использован для выполнения радиального преобразования Гильберта [28]. В отличие от обычно используемых в обработке изображений двумерных преобразований Гильберта [29], радиальное преобразование является изотропным [30, 31]. Показано существенное увеличение контраста при использовании вихревого фильтра, в том числе по сравнению с фильтром высоких частот.

В работе [32] предложено заменить центральную часть вихревого пространственного фильтра на постоянное значение. В этом случае формируется псевдорельефное изображение, облегчающее визуальное наблюдение мелких деталей изображения. Также при небольшой модификации центральной части рассматриваемого фильтра возможно формирование псевдорельефных изображений для визуального выделения протяжённых объектов различных направлений. Аналогичный фильтр использован для построения спираллограмм [33] – интерференционных картин фазовых объектов, учитывающих направление изменения фазовой функции. Это позволяет визуально различать прозрачные объекты, имеющие включения с различной оптической плотностью. В работе [34] были применены вихревые фильтры с различными порядками сингулярности (в том числе дробными) для построения спираллограмм. В общем случае для выпуклых объектов по направлению закрутки можно определить, является ли оптическая плотность объекта больше оптической плотности окружающей среды либо меньше. При этом на численных примерах было показано, что количество витков спиралей на спираллограммах пропорционально кратности набега фазы.

Модифицированные вихревые фильтры, например, дробных порядков [35, 36], анизотропные [37, 38] или смещённые [39] могут использоваться для избирательного выделения краёв.

Вихревые фильтры высоких порядков были использованы для расщепления контуров световых кри-

вых и внесения фазового градиента вдоль этих кривых [40]. Расщепление светового контура востребовано при оптическом захвате и манипуляциях с микрочастицами различного типа (прозрачными и непрозрачными). Генерация фазового градиента востребована в различных приложениях, так как в этом случае формируется поперечный поток энергии в заданном направлении.

В задачах выделения краёв и визуального контрастирования выбор параметров вихревого фильтра может быть не очевидным и требовать подбора. Подбор параметров можно осуществлять динамически за счёт использования ПМС. Однако это не только требует перестройки распределения, но и определения характера перестройки. В данной работе предлагается осуществить одновременное преобразование анализируемого объекта набором из нескольких пространственных фильтров, которые могут различаться как по типам, так и параметрически.

Такое преобразование возможно осуществить при использовании многопорядковых дифракционных оптических элементов [41], согласованных с заданным набором фильтров.

Удобство такого подхода состоит в том, что одновременно визуализируется преобразование различных типов или с различными параметрами. В этом случае возможна сравнительная оценка преобразованных распределений по некоторым критериям, в том числе по визуальному восприятию.

1. Теоретические основы

Основная концепция оптической обработки на основе пространственного фильтра с использованием ОПФ показана на рис. 1.

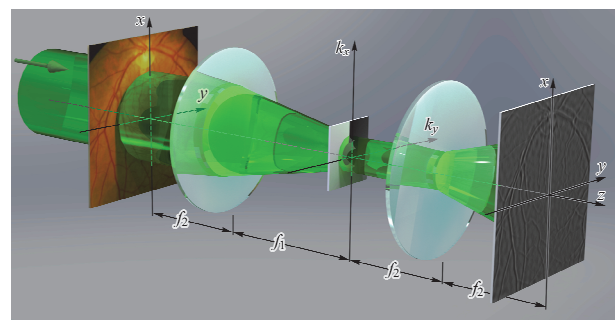


Рис. 1. Схема для реализации оптической пространственной фильтрации на основе двухлинзовой системы

Коллимированный лазерный пучок падает на обрабатываемый объект. Затем излучение, несущее информацию об объекте, преобразуется через ОПФ с помощью собирающей линзы, отображая разные пространственные частоты в разные области в фокальной плоскости.

В спектре Фурье низкие пространственные частоты находятся в центральной части с высокой интенсивностью, а высокие пространственные частоты – на периферии с низкой интенсивностью. Различные ме-

тоды обработки изображения, такие как низкочастотный, полосовой, высокочастотный, а также фазовые фильтры, используются в плоскости Фурье для обработки различных пространственных частот для различных приложений. Обратное преобразование Фурье с другой линзой используется для отображения преобразованного изображения на ПЗС-камеру.

Математически действие оптической пространственной фильтрации на основе двухлинзовой системы описывается следующим образом. Действие первой линзы соответствует преобразованию Фурье от объекта:

$$G(u, v) = \mathfrak{F}\{g(x, y)\} = \frac{k}{f_1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp\left[-\frac{ik}{f_1}(xu + yv)\right] dx dy, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число лазерного излучения с длиной волны λ , f_1 – фокусное расстояние первой линзы.

Далее выполняется действие фильтрации при прохождении пространственного спектра (1) через фильтр $H(u, v)$, расположенный в фокальной плоскости:

$$G_H(u, v) = G(u, v)H(u, v). \quad (2)$$

Затем действие второй линзы с фокусным расстоянием f_2 позволяет сформировать преобразованное изображение:

$$g_H(x', y') = \mathfrak{F}\{G_H(u, v)\} = \frac{k}{f_2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_H(u, v) \exp\left[-\frac{ik}{f_2}(x'u + y'v)\right] dx dy. \quad (3)$$

Хорошо известны амплитудные фильтры следующего вида:

$$H(u, v) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \sqrt{u^2 + v^2} < r_s, \\ 1, & r_s \leq \sqrt{u^2 + v^2} \leq r_e, \\ 0, & r_e < \sqrt{u^2 + v^2}. \end{cases} \quad (4)$$

Выделение краёв при использовании полосового фильтра (4) достигается за счёт подавления низких пространственных частот и выделения высокочастотных компонент, которые как раз соответствуют резким перепадам яркости объекта.

Отметим, что при использовании полосовых фильтров (4) требуется подобрать оптимальные параметры (радиусы полос) для выполнения определённой операции.

Также для выделения краёв применяют пространственные фильтры, осуществляющие оптическое дифференцирование вдоль направления под углом φ_0 :

$$H(u, v) = u \cos \varphi_0 + v \sin \varphi_0. \quad (5)$$

Принцип действия основан на резком увеличении значения производной на краях, где происходит значи-

тельное изменение яркости объекта. Из выражения (5) также видно, что такой фильтр усиливает вклад высокочастотных составляющих. В связи с этим выделять края независимо от направления можно с использованием радиальных фильтров следующего вида:

$$H(u, v) = \left(\sqrt{u^2 + v^2}\right)^q. \quad (6)$$

Преимущество фильтров (5) и (6) состоит в отсутствии зависимости от размера пространственного спектра. Однако фильтры (4)–(6) являются амплитудными, что приводит к потере энергии, так как часть пространственного спектра блокируется.

Энергетически эффективным является фазовый вариант дифференциального фильтра:

$$H(u, v) = \exp\left[i \arg(u \cos \varphi_0 + v \sin \varphi_0)\right], \quad (7)$$

где $\arg()$ – операция вычисления фазы.

Аналогом фильтра (6) можно считать фильтр Гильберта [29]:

$$H(u, v) = i \operatorname{sgn}(u \cos \varphi_0 + v \sin \varphi_0), \quad (8)$$

где $\operatorname{sgn}()$ – функция взятия знака.

Удобным подходом, сохраняющим энергию, не зависящим от размера пространственного спектра, а также направления выделения краёв, является применение вихревых фазовых фильтров следующего вида [28, 30, 31]:

$$H(\varphi) = \exp(im\varphi). \quad (9)$$

Универсальность вихревого фильтра (9) состоит в том, что вариации одного параметра m , который может принимать дробные значения, позволяет выделять не только контур целиком, но и отдельные части [35, 36]. Кроме того, смещение вихревого фильтра также позволяет выполнять направленное выделение контуров [39].

2. Численное моделирование

2.1. Пространственная фильтрация на основе двухлинзовой системы

На рис. 2 показаны результаты применения фильтра (4) для подавления высоких (рис. 2в, з) и низких частот (рис. 2д, е) к пространственному спектру изображения «крюк» (рис. 2а, б). В качестве нормированного радиуса r_0 выбран размер центрального светового пятна пространственного спектра (рис. 2б).

Видно, что при подавлении низких частот в области радиусом около $5r_0$ можно выделить контур изображения.

2.2. Применение вихревого фильтра

Хотя наиболее известным является вихревой фазовый фильтр первого порядка $m = 1$, возможно использование фильтров с более высокими целыми, а также дробными порядками.

На рис. 3 показаны результаты моделирования применения различных фильтров вида (5). Видно, что при $m = 1$ происходит практически равномерное выделение контура независимо от направления. При использовании других значений m чётче выделяются разные части контура, что может быть полезно для всестороннего анализа объекта.

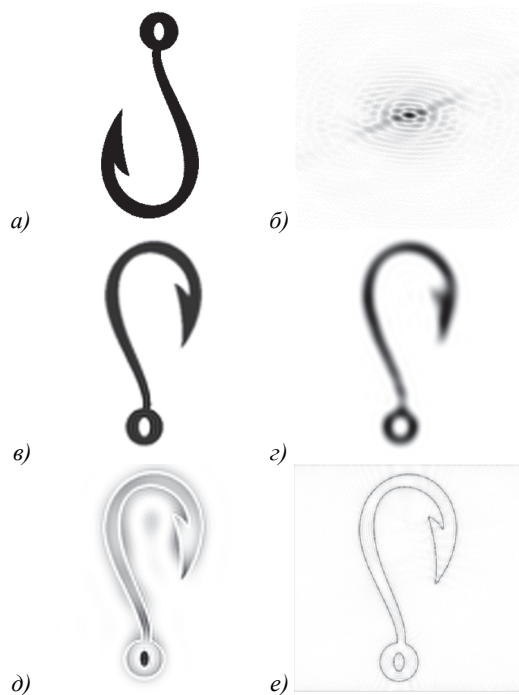


Рис. 2. Демонстрация действия амплитудных фильтров (4) для объекта «крюк» (а) в плоскости его пространственного спектра (б): $r_s = 0, r_e = 15r_0$ (в), $r_s = 0, r_e = 7r_0$ (г), $r_s = 2r_0, r_e = 15r_0$ (д), $r_s = 5r_0, r_e = 30r_0$ (е) (рисунки инвертированы)

2.3. Применение дифференцирующего и радиального фильтров

Чтобы продемонстрировать действие дифференцирующего фильтра (5) вдоль некоторого направления, а также радиального фильтра (6), мы рассмотрели объект, состоящий из нескольких фигур, имеющих различную геометрию контуров (рис. 4а).

Как видно из рис. 4, дифференцирующие фильтры очень четко выделяют соответствующие направления. Радиальные фильтры выделение краев осуществляют менее четко, однако оно происходит равномерно по всем направлениям.

2.4. Сравнение действия классического и радиального фильтра Гильберта

В данном параграфе мы демонстрируем (рис. 5) особенности классического фильтра Гильберта [29] и радиального фильтра Гильберта [30, 31].

Отметим, что радиальный фильтр Гильберта (рис. 5и, к) фактически соответствует вихревому фазовому фильтру [28] первого порядка $m = 1$ (9). Эти фильтры мы применили к объекту, представленному

рис. 4а, чтобы можно было сравнить с результатами предыдущего параграфа.

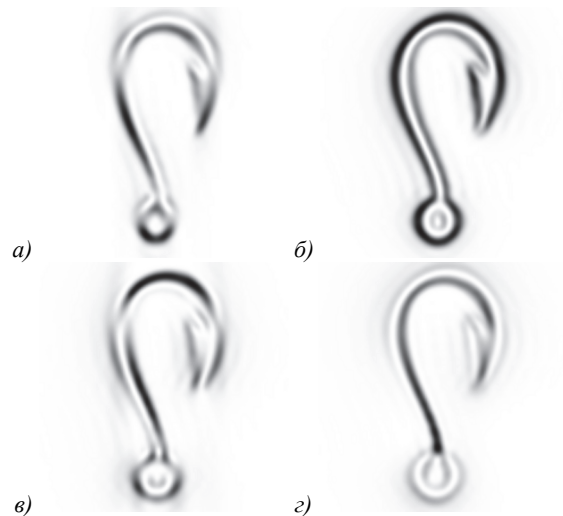


Рис. 3. Демонстрация действия вихревых фильтров (5): $m = 0,5$ (а), $m = 1$ (б), $m = 1,5$ (в), $m = 2$ (г) (рисунки инвертированы)

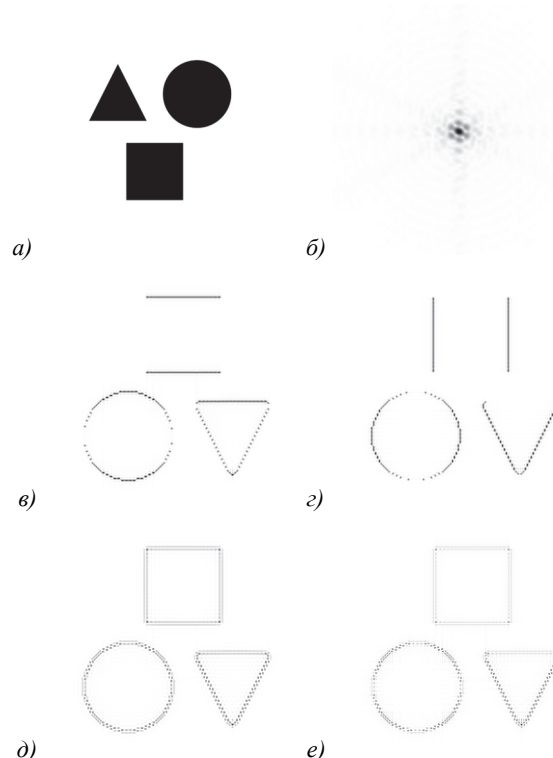


Рис. 4. Демонстрация действия дифференцирующего (5) и радиального (6) фильтров для трёх объектов разной геометрии (а) в плоскости его пространственного спектра (б): горизонтальный (5) (в), вертикальный (5) (г), радиальный (6) при $q = 1$ (д), при $q = 2$ (е) (рисунки инвертированы)

Как видно из приведенных на рис. 5 результатов моделирования, одномерный фильтр Гильберта (7) или (8) (рис. 5а-е) позволяет выделять направления контуров, соответствующие линии фазового скачка фильтра. Хотя края получаются смазанными по сравнению с дифференциальным фильтром (5), что связа-

но с отсутствием амплитудной составляющей, которая усиливает вклад высоких частот.

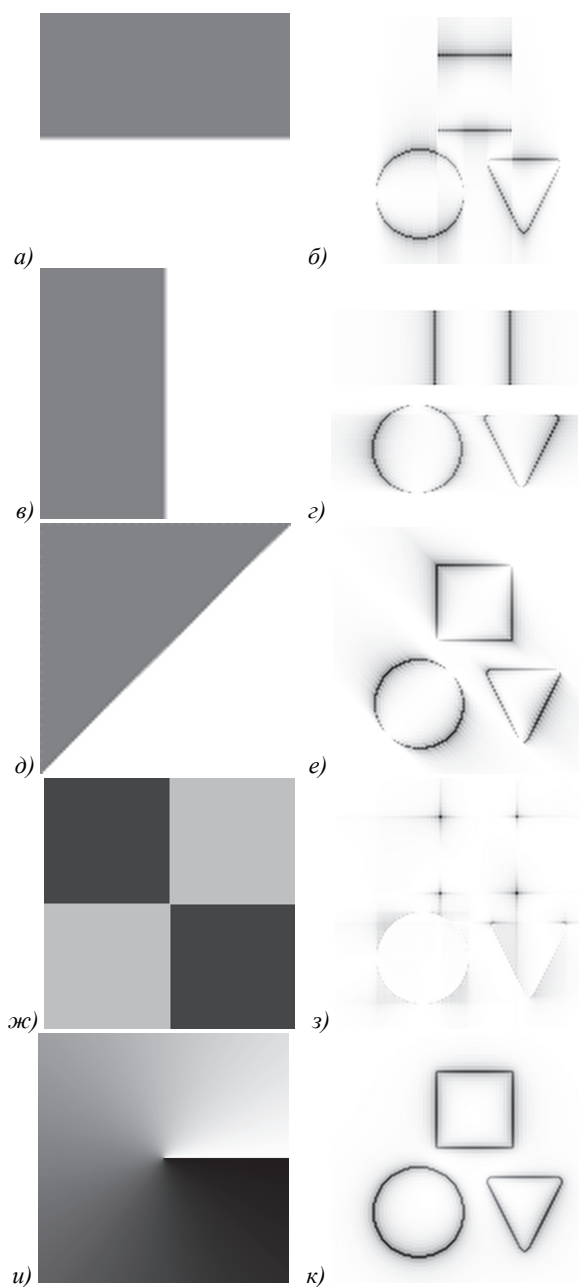


Рис. 5. Демонстрация действия фильтра Гильберта: горизонтальный (а, б), вертикальный (в, г), диагональный (д, е), двумерный (ж, з) и радиальный (и, к) (рисунки инвертированы)

Таким образом, вращая одномерный фильтр Гильберта, можно выделять разные направления контура. Интересно, что диагональный вариант (рис. 5д, е) позволил для рассматриваемых объектов осуществить практически равномерное выделение контуров. В то время как двумерный вариант фильтра Гильберта (рис. 5ж, з) резко подчеркнул углы квадрата и горизонтальные углы треугольника. Таким образом, имеет место существенная корреляция геометрии фильтра и анализируемых фигур. Если нужно избежать такой ситуации и обеспечить равномерное

(анизотропное) выделение контура, то используют так называемое радиальное преобразование Гильберта [30, 31], которое фактически соответствует использованию вихревого фильтра (9) первого порядка [28].

Таким образом, на основе проведенных исследований, компромиссным и в то же время универсальным вариантом можно считать вихревой фазовый фильтр.

2.5. Многопорядковые ДОЭ, согласованные с вихревыми фильтрами

Как было продемонстрировано выше, вариации параметров рассматриваемых пространственных фильтров приводят к существенному изменению картины преобразованного объекта: возможно как равномерное выделение контура, так и подчёркивание отдельных частей и направлений.

Чтобы обеспечить одновременное преобразование анализируемого объекта набором из нескольких пространственных фильтров, которые могут различаться как по типам, так и параметрически, предлагается использовать многопорядковые дифракционные оптические элементы, согласованные с заданным набором фильтров. Принцип расчёта многопорядковых ДОЭ основан на кодировании набора заданных фильтров различными пространственными несущими частотами [41]:

$$\tau(x, y) = \sum_{p=1}^P H_p(x, y) \exp[i(\alpha_p x + \beta_p y)], \quad (10)$$

где $H_p(x, y)$ – вихревой фильтр вида (4) с различными значениями вихревого порядка, (α_p, β_p) – пространственные частоты.

На рис. 6 показаны результаты применения 8-порядкового ДОЭ (10), согласованного с вихревыми фильтрами (9) при $m=1, \dots, 8$, к пространственному спектру изображения «треугольник» (рис. 6а, б). Видно, что наиболее чётко контур выделяется при $m=1$. При $m=2, 3$ более ярко выделяются углы объекта. При более высоких порядках m подчёркиваются различные части контура.

В работах [35–39] были рассмотрены различные модификации вихревых фильтров (9) с целью избирательного выделения краёв. Некоторые из них были использованы при численном и экспериментальном исследовании, описанном в следующем параграфе.

3. Экспериментальные результаты

Для экспериментального исследования предложенных многоканальных фильтров была использована оптическая установка на основе отражательного пространственного модулятора света (ПМС) HOLO-EYE PLUTO VIS (1920×1080 пикселей, размер пикселя – 8 мкм) для реализации рассчитанных фазовых масок фильтров (см. рис. 7).

Линейно поляризованный Гауссов пучок твердотельного лазера (длина волны $\lambda = 532$ нм) расширялся и коллимировался с помощью комбинации двух линз L1 и L2 с фокусными расстояниями 25 и

150 мм. Зеркала M1 и M2 направляли сформированный пучок на дисплей модулятора света. Для реализации тестовых амплитудных изображений различных двумерных объектов использовались амплитудные маски AM (пример такой маски, использованной при моделировании, показан на вставке к рис. 7).

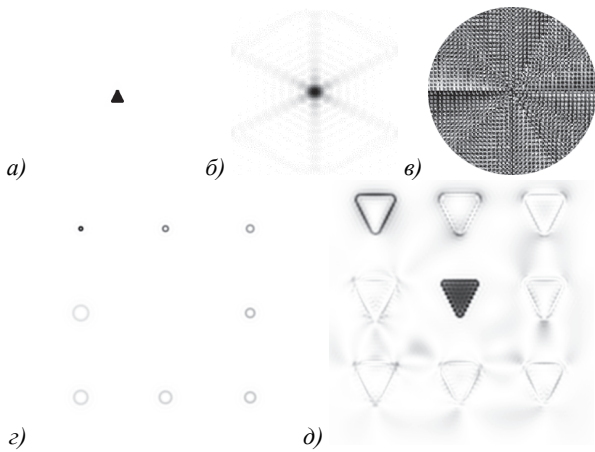


Рис. 6. Моделирование применения к объекту «треугольник» (а) в плоскости пространственного спектра (б) 8-порядкового ДОЭ, согласованного с вихревыми фильтрами (9) при $m = 1, \dots, 8$: фаза ДОЭ (в), вид ФРТ (г), действие для изображения «треугольник» (д) (рисунки инвертированы)

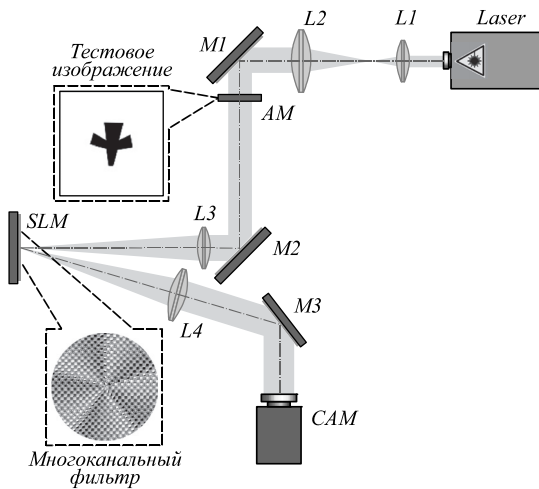


Рис. 7. Оптическая схема для экспериментального исследования рассчитанных многоканальных фильтров: Laser – твердотельный лазер ($\lambda = 532$ нм); L1, L2, L3, L4, L5 и L6 – линзы (фокусные расстояния $f_1 = 25$ мм, $f_2 = 150$ мм, $f_3 = 500$ мм и $f_4 = 500$ мм); M1, M2 и M3 – зеркала; AM – амплитудная маска; SLM – отражающий ПМС; CAM – видеокамера. На вставках показан пример амплитудного объекта и пример фазовой маски рассчитанного многоканального фильтра

Затем для реализации 4-ф оптической системы пространственной фильтрации использовалась комбинация линз L3 и L4 с фокусным расстоянием 500 мм, а также модулятор света. Пример фазовой маски, использованной в эксперименте и реализованной с помощью модулятора света, показан на вставке к рис. 7.

Для регистрации распределений интенсивности, сформированных в выходной плоскости используемой 4-ф оптической системы, была использована видеокамера CAM (TOUPCAM UNCCD00800KPA, 1600×1200 пикселей, с размером пикселя 3,34 мкм). Зеркало M3 при этом направляло пучок, отражённый от модулятора, на дисплей видеокамеры.

В экспериментах мы исследовали три различных типа многоканальных фильтров:

I тип: 5-канальный фильтр, согласованный с оптическим вихревым (ОВ) пучком первого порядка, распространяющимся на оси оптической системы, и набором из четырёх несимметричных ОВ-пучков первого порядка с различными поперечными смещениями их центров относительно осей их распространения;

II тип: 4-канальный фильтр, согласованный с набором ОВ-пучков с топологическими зарядами +1, +2, +3 и +4;

III тип: 5-канальный фильтр, согласованный с ОВ-пучком первого порядка, распространяющимся на оси оптической системы, и набором суперпозиций двух ОВ-пучков с топологическими зарядами ± 1 и различными фазовыми сдвигами $\Delta\phi$ между пучками в суперпозиции.

В случае первого из исследованных фильтров (5-ти канальный фильтр I типа) смещения центров пучков определялись параметром Δ . Для ОВ-пучков, сформированных в различных порядках дифракции, центр пучка смещался на Δ по одной из прямоугольных координат в положительном или отрицательном направлении (рис. 8). Как известно, такое смещение центра пучка приводит к формированию асимметричного распределения интенсивности со спиральным волновым фронтом [42, 43]. Положение максимума интенсивности генерируемого асимметричного распределения интенсивности зависит от направления смещения центра пучка. Таким образом, такие многоканальные фильтры можно использовать для одновременного выделения контуров всего изображения в целом и его различных частей (например, верхней/нижней, правой/левой). Результаты, полученные в этом случае численно и экспериментально для нескольких различных изображений, показаны на рис. 8.

В случае 4-канального фильтра II типа при его освещении плоской волной разные ОВ-пучки формируются в разных порядках дифракции (рис. 9). Результаты, полученные численно и экспериментально для нескольких различных изображений с помощью этого фильтра, показаны на рис. 9.

Последний из исследованных – 5-канальный фильтр III типа – был предназначен для формирования как осевого ОВ-пучка первого порядка, так и набора суперпозиций ОВ-пучков ± 1 порядка с различными фазовыми сдвигами $\Delta\phi$ между пучками в суперпозиции. Как известно, суперпозиция двух ОВ-пучков с противополож-

ными топологическими зарядами m позволяет сформировать распределения интенсивности в виде расположенных по окружности $2m$ световых пятен (рис. 10)

[44]. Дополнительный фазовый сдвиг между этими ОВ-пучками позволяет контролировать ориентацию формируемых световых пятен.

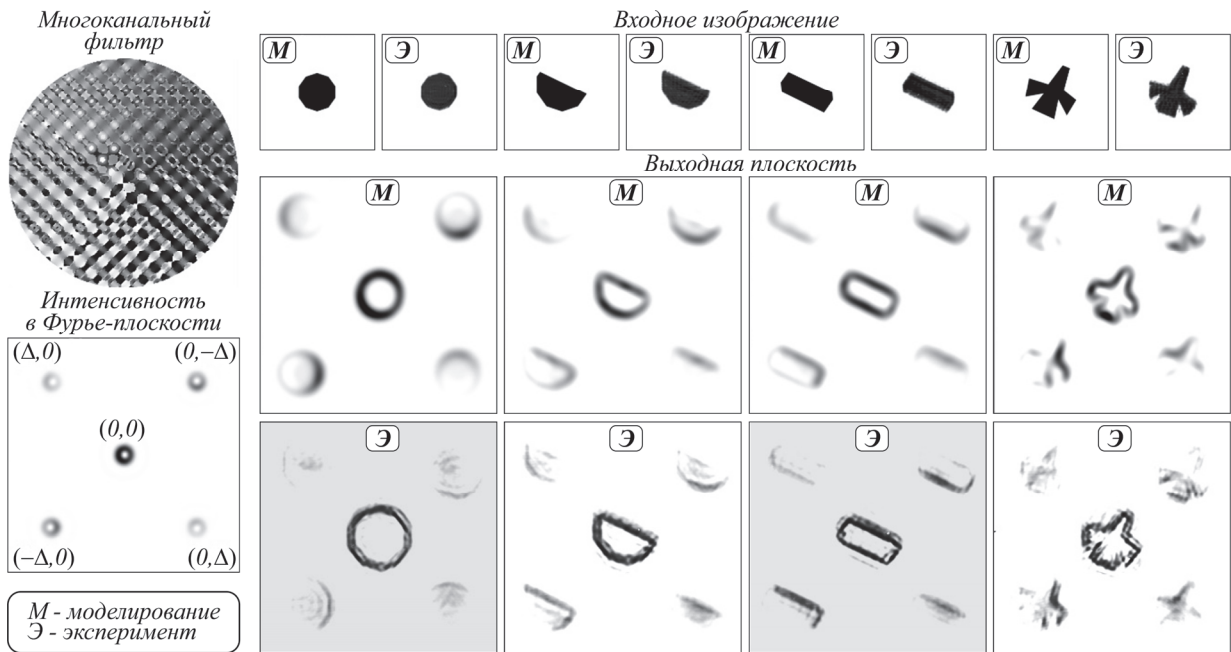


Рис. 8. 5-канальный фильтр I типа. В верхнем ряду показаны фазовая маска рассчитанного многоканального фильтра и сформированное им распределение интенсивности в Фурье-плоскости. Смоделированные и экспериментально полученные распределения интенсивности показаны для четырёх различных амплитудных масок. Рисунки инвертированы

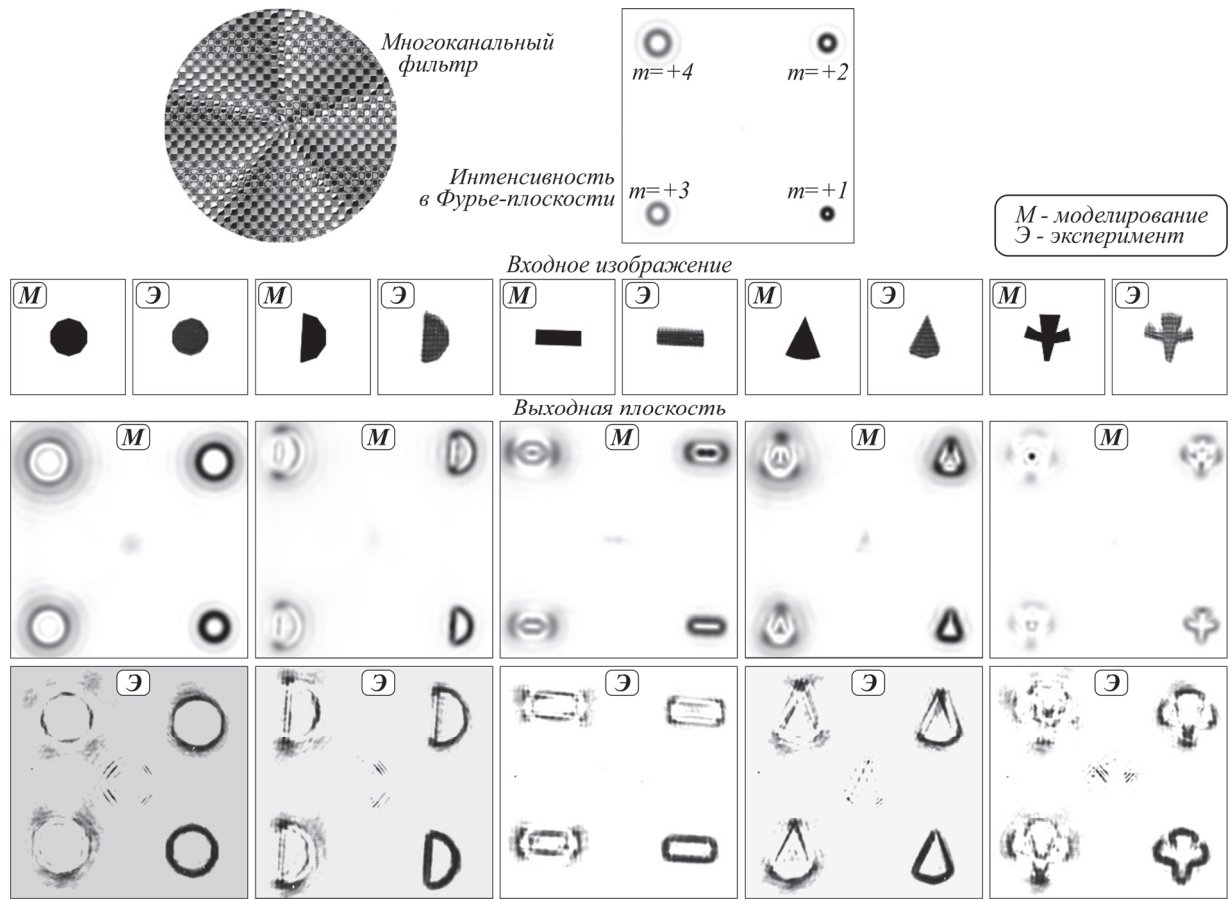


Рис. 9. 4-канальный фильтр II типа (остальное описание, как на рис. 7). Рисунки инвертированы

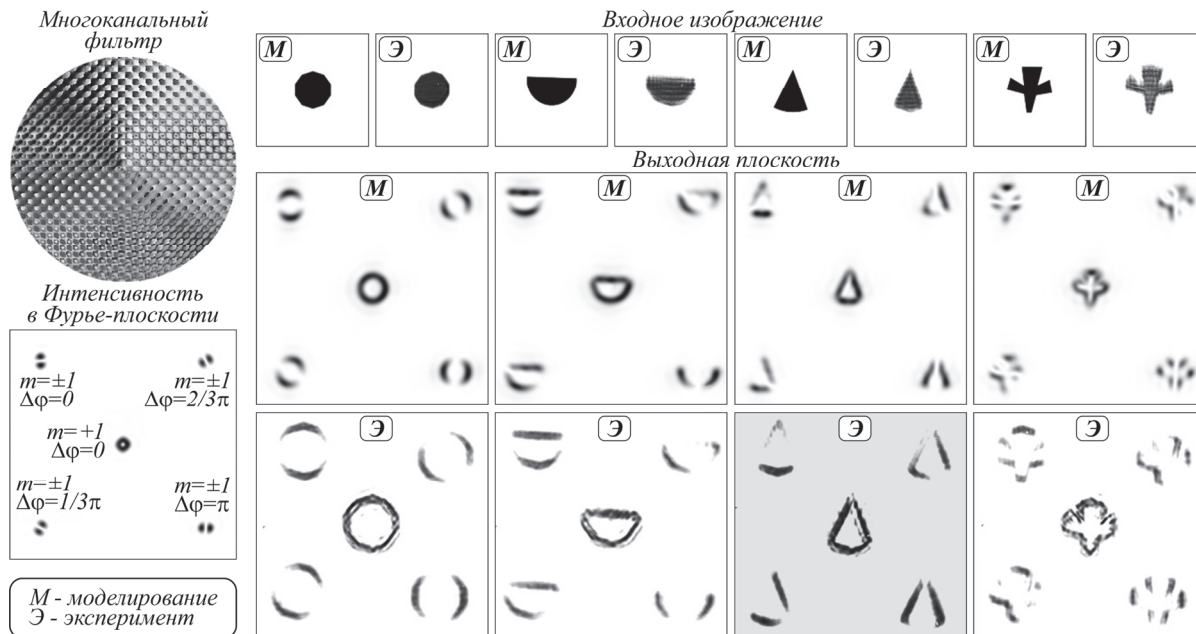


Рис. 10. 5-канальный фильтр III типа (остальное описание, как на рис. 7). Рисунки инвертированы

Как видно из рис. 10, многоканальный фильтр III типа формирует разнесённую по окружности серию двойных световых пятен, повёрнутых относительно друг друга на различные углы. Этот фильтр можно использовать для одновременного выделения контуров всего изображения и различных противоположных частей изображения, вдоль определённых направлений. Дальнейшие модификации такого фильтра могут быть использованы для формирования ещё большего числа суперпозиций, повёрнутых друг к другу на меньшие углы, и таким образом позволят проанализировать ещё больше локальных участков контуров анализируемого изображения.

Заключение

Пространственная фильтрация оптическими методами является мощным инструментом для обработки оптических сигналов и улучшения качества изображений, в том числе выделения краёв объектов. Существуют различные оптические фильтры, которые могут быть использованы для выделения краёв объектов на изображении. Выбор конкретного метода зависит от характеристик изображения, требований к точности и эффективности, а также от конкретной задачи обработки, которую необходимо решить.

В данной работе мы численно продемонстрировали действие различных пространственных фильтров, включая полосовые, дифференциальные, радиальные и вихревые различных типов, а также фильтры Гильберта. На фигурах, имеющих различную геометрию контуров, показаны преимущества и недостатки различных фильтров по четкости и инвариантности направления выделения краёв.

Для обеспечения возможности сравнительной оценки преобразования объекта, в том числе по визу-

альному восприятию, нами предложено совмещение сразу нескольких фильтров в одном многопорядковом оптическом элементе.

Одной из особенностей многопорядковых оптических фильтров является параллельная обработка, что позволяет быстро анализировать объекты, преобразованные различными способами.

Показана эффективность многопорядковых фильтров, согласованных с вихревой фазой различных порядков, в том числе, со смещением, для одновременного выделения контуров объекта, его углов и различных частей контура. Проведена численная и экспериментальная апробация 4- и 5-канальных пространственных вихревых фильтров различных типов на тестовых объектах. Показана возможность использования предложенных фильтров для одновременного выделения краёв всего изображения и различных частей изображения, в том числе вдоль определённых направлений, с целью извлечения большего числа особенностей из анализируемого изображения.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 1 «Национальный центр исследования архитектур суперкомпьютеров. Этап 2023-2025» в части численного моделирования, а также в рамках Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» в теоретической части.

References

- [1] Gillespie WA. Optical information processing. Phys Educ 1999; 127(3): 29. DOI: 10.1088/0031-9120/29/3/003.
- [2] Goswami D. Optical computing. Resonance 2003; 8(6): 56-71. DOI: 10.1007/BF02837869.
- [3] Ambs P. Optical computing: A 60-year adventure. Adv Opt Technol 2010; 2010: 372652. DOI: 10.1155/2010/372652.

- [4] Minzioni P, Lacava C, Tanabe T, et al. Roadmap on all-optical processing. *J Opt* 2019; 21(6): 063001. DOI: 10.1088/2040-8986/ab0e66.
- [5] Kazanskiy NL, Butt MA, Khonina SN. Optical computing: Status and perspectives. *Nanomaterials* 2022; 12(13): 2171. DOI: 10.3390/nano12132171.
- [6] Weaver CS, Goodman JW. A technique for optically convolving two functions. *Appl Opt* 1966; 5(7): 1248-1249. DOI: 10.1364/AO.5.001248.
- [7] Kasana RS, Bhatnagar GP, Dubey MC. A review of mathematical operations by optical data processing. *IEE-IERE Proc India* 1975; 13(4): 134-144. DOI: 10.1049/iipi.1975.0034.
- [8] Javidi B, Hornder JL. Real-time optical information processing. Boston: Academic Press; 1994.
- [9] Goodman JW. 4 decades of optical information processing. *Opt Photonics News* 1991; 2(2): 11-15. DOI: 10.1364/OPN.2.2.000011.
- [10] Heanue JF, Bashaw MC, Hesselink L. Volume holographic storage and retrieval of digital data. *Science* 1994; 265(5173): 749-752. DOI: 10.1126/science.265.5173.74.
- [11] Goodman J. Introduction to Fourier optics. San Francisco, CA: McGraw Hill; 1968.
- [12] Bracewell RB. The Fourier transform and its application. McGraw Hill; 1965.
- [13] Stark H. Applications of optical Fourier transforms. Elsevier; 2012.
- [14] Zernike F. How I discovered phase contrast. *Science* 1955; 121(3141): 345-349. DOI: 10.1126/science.121.3141.345.
- [15] Casasent D, Furman A. Determining optimal matched filter parameters. *Appl Opt* 1976; 15(7): 1690-1691. DOI: 10.1364/AO.15.001690.
- [16] Yu FTS, Gregory DA. Optical pattern recognition: architectures and techniques. *Proc IEEE* 1996; 84(5): 733-752. DOI: 10.1109/5.488743.
- [17] Glückstad J, Mogensen PC, Eriksen RL. The generalized phase contrast method and its applications. *DOPSNYU* 2001; 1: 49-54.
- [18] Juday R. Correlation filter basics. In Book: Vijaya Kumar BVK, Mahalanobis A, Juday RD. Correlation pattern recognition. Ch 5. Cambridge University Press; 2005: 130-195. DOI: 10.1017/cbo9780511541087.006.
- [19] Yelleswarapu CS, Kothapalli S-R, Rao DVGLN. Optical Fourier techniques for medical image processing and phase contrast imaging. *Opt Commun* 2008; 281(7): 1876-1888. DOI: 10.1016/j.optcom.2007.05.072.
- [20] Schausberger SE, Heise B, Maurer C, Bernet S, Ritsch-Marte M, Stifter D. Flexible contrast for low-coherence interference microscopy by Fourier-plane filtering with a SLM. *Opt Lett* 2010; 35(24): 4154-4156. DOI: 10.1364/OL.35.004154.
- [21] Maurer C, Jesacher A, Bernet S, Ritsch-Marte M. What spatial light modulator can do for optical microscopy. *Laser Photon Rev* 2011; 5(1): 81-101. DOI: 10.1002/lpor.200900047.
- [22] Zheng GA, Horstmeyer R, Yang CH. Wide-field, high-resolution Fourier ptychographic microscopy. *Nat Photon* 2013; 7(9): 739-745. DOI: 10.1038/nphoton.2013.187.
- [23] Xiong Y, He A, Quan C. Cryptanalysis of an optical cryptosystem based on phase-truncated Fourier transform and nonlinear operations. *Opt Commun* 2018; 428: 120-130. DOI: 10.1016/j.optcom.2018.07.058.
- [24] Zhu X, Yao H, Yu J, Gbur G, Wang F, Chen Y, Cai Y-j. Inverse design of a spatial filter in edge enhanced imaging. *Opt Lett* 2020; 45(9): 2542-2545. DOI: 10.1364/OL.391429.
- [25] Kato H, Goodman JW. Nonlinear filtering in coherent optical systems through halftone screen processes. *Appl Opt* 1975; 14(8): 1813-1824. DOI: 10.1364/AO.14.001813.
- [26] Babkina TM, Voloshinov VB. A new method of acousto-optic image processing and edge enhancement. *J Opt A: Pure Appl Opt* 2001; 3(4): S54. DOI: 10.1088/1464-4258/3/4/359.
- [27] Popescu G, Deflores LP, Vaughan JC, Badizadegan K, Iwai H, Dasari RR, Feld MS. Fourier phase microscopy for investigation of biological structures and dynamics. *Opt Lett* 2004; 29(11): 2503-2505. DOI: 10.1364/OL.29.002503.
- [28] Khonina SN, Kotlyar VV, Shinkaryev MV, Soifer VA, Uspleniev GV. The phase rotor filter. *J Mod Opt* 1992; 39(5): 1147-1154. DOI: 10.1080/09500349214551151.
- [29] Hahn SL. Hilbert transforms in signal processing. Boston, London: Artech House; 1996.
- [30] Davis JA, McNamara DE, Cottrell DM, Campos J. Image processing with the radial Hilbert transform: Theory and experiments. *Opt Lett* 2000; 25(2): 99-101. DOI: 10.1364/OL.25.000099.
- [31] Guo C-S, Han Y-J, Xu J-B, Ding J. Radial Hilbert transform with Laguerre-Gaussian spatial filters. *Opt Lett* 2006; 31(10): 1394-1396. DOI: 10.1364/OL.31.001394.
- [32] Jesacher A, Furhapter S, Bernet S, Ritsch-Marte M. Shadow effects in spiral phase contrast microscopy. *Phys Rev Lett* 2005; 94(23): 233902. DOI: 10.1103/PhysRevLett.94.233902.
- [33] Maurer C, Bernetand S, Ritsch-Marte M. Refining common path interferometry with a spiral phase Fourier filter. *J Opt A: Pure Appl Opt* 2009; 11(9): 094023. DOI: 10.1088/1464-4258/11/9/094023.
- [34] Ananin MA, Khonina SN. Modelling of optical processing of images with use of the vortical spatial filter. *Computer Optics* 2009; 33(4): 466-472.
- [35] Davis JA, Smith DA, McNamara DE, Cottrell DM, Campos J. Fractional derivatives – analysis and experimental implementation. *Appl Opt* 2001; 40(32): 5943-5948. DOI: 10.1364/AO.40.005943.
- [36] Wang J, Zhang W, Qi Q, Zheng S, Chen L. Gradual edge enhancement in spiral phase contrast imaging with fractional vortex filters. *Sci Rep* 2015; 5: 15826. DOI: 10.1038/srep15826.
- [37] Situ G, Pedrini G, Osten W. Spiral phase filtering and orientation-selective edge detection/enhancement. *J Opt Soc Am A* 2009; 26(8): 1788-1797. DOI: 10.1364/JOSAA.26.001788.
- [38] Sharma MK, Joseph J, Senthilkumaran P. Selective edge enhancement using anisotropic vortex filter. *Appl Opt* 2011; 50(27): 5279-5286. DOI: 10.1364/AO.50.005279.
- [39] Sharma MK, Joseph J, Senthilkumaran P. Selective edge enhancement using shifted anisotropic vortex filter. *J Opt* 2013; 42: 1-7. DOI: 10.1007/s12596-012-0089-6.
- [40] Khonina SN, Porfirev AP. Generation of multi-contour plane curves using vortex beams. *Optik* 2021; 229: 166299. DOI: 10.1016/j.ijleo.2021.166299.
- [41] Kazanskiy NL, Khonina SN, Karpeev SV, Porfirev AP. Diffractive optical elements for multiplexing structured laser beams. *Quantum Electron* 2020; 50(7): 629-635. DOI: 10.1070/QEL17276.
- [42] Kotlyar VV, Kovalev AA, Porfirev AP. Asymmetric Gaussian optical vortex. *Opt Lett* 2017; 42(1): 139-142. DOI: 10.1364/OL.42.000139.
- [43] Khonina SN, Ustinov AV. Focusing of shifted vortex beams of arbitrary order with different polarization. *Opt Commun* 2018; 426: 359-365. DOI: 10.1016/j.optcom.2018.05.070.
- [44] Vickers J, Burch M, Vyas R, Singh S. Phase and interference properties of optical vortex beams. *J Opt Soc Am A* 2008; 25(3): 823-827. DOI: 10.1364/JOSAA.25.000823.

Сведения об авторах

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор Самарского университета; главный научный сотрудник Института систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт». Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: khonina@ipsiras.ru.

Порфирьев Алексей Петрович, 1987 года рождения, в 2010 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (ныне Самарский университет) по специальности «Прикладные математика и физика». Кандидат физико-математических наук (2013 год). Ассистент кафедры технической кибернетики Самарского университета, научный сотрудник лаборатории микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт». Область научных интересов: дифракционная оптика, оптическое манипулирование. E-mail: porfirev.alexey@smr.ru.

Хорин Павел Алексеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Самарского университета. Область научных интересов: математическое моделирование, дифракционная оптика, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: paul.95.de@gmail.com / khorin.pa@ssau.ru.

Дзюба Алексей Павлович, аспирант Самарского университета. Область научных интересов: компьютерное зрение, нейронные сети, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: alexeydzyuba98@gmail.com.

Серафимович Дмитрий Павлович, студент Самарского университета. Область научных интересов: математическое моделирование, цифровая обработка изображений. E-mail: dmitry.serafimovich@gmail.com.

Скиданов Роман Васильевич, 1973 года рождения. В 1990 году с отличием окончил Самарский государственный университет (СамГУ) по специальности «Физика». Доктор физико-математических наук (2007 год), заместитель директора, главный научный сотрудник Института систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт», профессор кафедры технической кибернетики Самарского университета. Р.В. Скиданов – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанофотоники. В списке научных работ Р.В. Скиданова 250 статей, 8 монографий. E-mail: romans@ipsiras.ru

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 23 января 2024 г. Окончательный вариант – 2 февраля 2024 г.

Multi-order optical spatial vortex filters for simultaneous contour extraction of various parts of an object

S.N. Khonina^{1,2}, A.P. Porfirev^{1,2}, P.A. Khorin¹, A.P. Dzyuba¹, D.P. Serafimovich^{1,2}, R.V. Skidanov^{1,2}
¹ Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34;
²Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute",
443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151

Abstract

We study the transformation of the analyzed object by a variety of spatial filters including bandpass, differential, radial filters, various types of vortex filters, and Hilbert filters. Advantages and disadvantages of different filters in terms of clarity and direction-invariance of edge extraction, as well as the energy efficiency are numerically demonstrated. Based on the results obtained, multi-order optical spatial vortex filters with different parameters are developed for simultaneously extracting contours of various object parts. We show that a multi-order filter makes it possible to form a set of images in one plane with a clearly defined contour, object corners and various parts of the contour. Numerical and experimental testing of 4- and 5-channel spatial vortex filters of various types was applied for test objects. A possibility of using the proposed filters to simultaneously highlight the edges of the entire image and various parts of the image in order to extract more features from the analyzed image is shown.

Keywords: spatial filtering, edge detection, multi-order optical filters.

Citation: Khonina SN, Porfirev AP, Khorin PA, Dzyuba AP, Serafimovich DP, Skidanov RV. Multi-order optical spatial vortex filters for simultaneous contour extraction of various parts of an object. *Computer Optics* 2024; 48(4): 525-534. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1497.

Acknowledgements: This study was conducted within the scientific program of the National Center for Physics and Mathematics, section #1 "National Center for Supercomputer Architecture Research. Stage 2023-2025" in part of numerical results and within the state assignment of the National Research Center "Kurchatov Institute" in theoretical part.

Authors' information

Svetlana Nikolaevna Khonina, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara National Research University. Main researcher of the Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute". Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: khonina@ipsiras.ru

Alexey Petrovich Porfirev (b. 1987) graduated (2010) from Samara National Research University, majoring in Applied Physics and Mathematics. He holds the Candidate's Degree in Physics and Mathematics (2013). Currently he is an assistant professor at Technical Cybernetics department of Samara National Research University and a researcher at Micro- and Nanotechnologies laboratory of the Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute". His current research interests include diffractive optics and optical manipulation. E-mail: porfirev.alexey@smr.ru

Pavel Alekseevich Khorin, Candidate of Physical and Mathematical Sciences; Senior researcher of Samara National Research University. Research interests: mathematical modeling, diffractive optics, optical and digital image processing. E-mail: paul.95.de@gmail.com / khorin.pa@ssau.ru

Alexey Pavlovich Dzyuba, postgraduate student at Samara University. Area of scientific interests: computer vision, neural networks, optical and digital image processing. E-mail: alexeydzyuba98@gmail.com

Dmitry Pavlovich Serafimovich, student at Samara University. Area of scientific interests: mathematical modeling, digital image processing. E-mail: dmitry.serafimovich@gmail.com

Roman Vasilevich Skidanov (b. 1973). Graduated with honours (1990) from Samara State University (SSU), majoring in Physics. He received his Doctor in Physics & Maths (2007) degrees from Samara State University. He is the vice director and the main researcher of the Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute", holding a part-time position of professor at Samara National Research University Technical Cybernetics sub-department. He is co-author of 250 scientific papers, 8 monographs. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics. E-mail: romans@ipsiras.ru

Received January 23, 2024. The final version – February 2, 2024.
