

Оптимизация параметров кольцевого и вихревого пространственных фильтров на основе образцов, сформированных оператором Кэнни

А.С. Хлебодаров
Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева
Самара, Россия
andr.w.h2002@mail.ru

Аннотация — Проведено исследование влияния изменения параметров кольцевого и вихревого пространственных фильтров на качество результатов оптического выделения границ на изображении. Разработан алгоритм поиска оптимальных параметров фильтров на основе минимизации среднеквадратичного отклонения от образцов, сформированных оператором Кэнни.

Ключевые слова — оптическое выделение границ, пространственный фильтр, оператор Кэнни, Фурье-коррелятор

I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из типов операций оптической пространственной фильтрации [1, 2] является выделение краёв объектов на изображениях. Это актуально, например, в области медицины, где с его помощью можно обрабатывать изображения препаратов крови или контрастировать рентгенограммы [3, 4]. Выделение границ на изображениях может осуществляться с применением кольцевого [3], а также вихревого пространственного фильтра [5, 6] и его различных модификаций [7-9].

Качество результатов обработки изображения с использованием вихревого фильтра зависит от его размера и порядка: при варьировании этих параметров наблюдается изменение толщины и чёткости выделенных границ. В связи с этим возникает вопрос об оптимальном сочетании параметров фильтра.

В данной работе проведено исследование влияния изменения параметров кольцевого и вихревого пространственных фильтров на качество результатов оптического дифференцирования, и разработан алгоритм оптимизации этих параметров для заданного изображения. Цель исследования – создать инструмент, позволяющий настраивать пространственный модулятор света (Spatial light modulator, SLM) под входное изображение в реальном эксперименте.

Исследование выполнялось на основе сравнительного моделирования оптического выделения границ для различных значений параметров фильтров. Разработанный алгоритм их оптимизации основан на выявлении значений параметров, при которых фиксируется наименьшее среднеквадратичное отклонение результирующего изображения от образцового, полученного с использованием цифрового оператора Кэнни [10].

II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Оптическое выделение границ производится с использованием оптической схемы, называемой Фурье-

коррелятором и состоящей из двух линз и помещённого между ними пространственного фильтра.

При прохождении пучка через линзу выполняется преобразование Фурье, определяемое следующей формулой:

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

где $g(x, y)$ – входное поле, k – волновое число, f – фокусное расстояние.

Рассматриваемые вихревые фильтры имеют вид:

$$v_m(x, y) = \exp \left(-\frac{x^2 + y^2}{s^2} \right) (x + iy)^m, \quad (2)$$

где s, m – параметры фильтра.

Также для сравнения используются амплитудные кольцевые фильтры вида:

$$\tau(r) = \begin{cases} 1, & r_1 < r < r_2; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}, \quad (3)$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – расстояние до точки (x, y) ; r_1, r_2 – параметры фильтра.

Для нахождения среднеквадратичного отклонения (СКО) σ между изображением, получаемым с помощью фильтра, и образцом будем пользоваться следующей формулой:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i (f_{0i} - f_i)^2}{\sum_i (f_{0i})^2}}, \quad (4)$$

где f_{0i} – образцовая функция, f_i – рассматриваемая функция.

III. РАЗРАБОТАННЫЙ АЛГОРИТМ

A. Краткое описание алгоритма

Сравнительное моделирование оптического выделения границ для различных значений параметров вихревого фильтра проводилось путём программирования в системе MATLAB этапов

преобразования пучка при его прохождении через Фурье-коррелятор. При этом использовалась формула (2) для задания функции фильтра, а также встроенные функции для прямого и обратного преобразований Фурье. Это моделирование показало, что при варьировании параметров получаются различные по качеству выделения границ результаты, и тем самым открыло вопрос об их оптимизации. В качестве решения этой задачи предлагается разработанный программный алгоритм. Он основывается на программе для сравнительного моделирования, но в нём добавлен перебор возможных значений параметров, для которых вычисляется СКО между результирующим изображением и изображением, полученным с помощью оператора Кэнни. Итоговые значения параметров соответствуют наименьшей зафиксированной величине СКО.

В. Результаты выполнения алгоритма

Примеры результатов выполнения алгоритма для тестовых изображений показаны на рис. 1 и 2. На них можно увидеть изображения, полученные с помощью цифрового оператора Кэнни (образец) и с использованием фильтров (2), (3) с рассчитанными оптимальными параметрами, при которых СКО от образца минимальное.

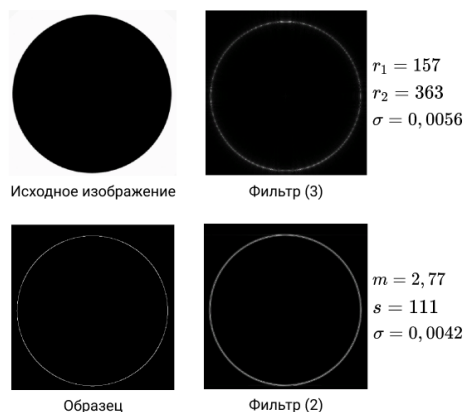


Рис. 1. Пример выполнения алгоритма для простого изображения

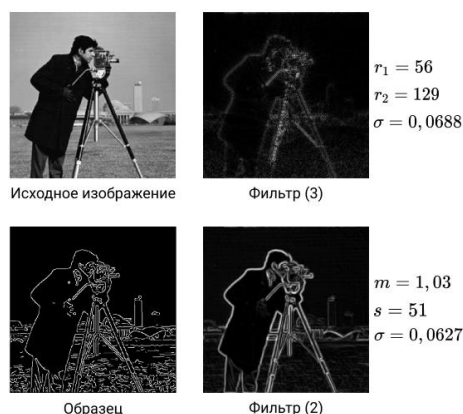


Рис. 2. Пример выполнения алгоритма для сложного изображения

По рис. 1,2 видно, что вихревой пространственный фильтр вида (2) работает не намного хуже оператора Кэнни. Это доказывает целесообразность его использования в целях выделения краёв на изображениях. По рис. 2 очевидно, что этот фильтр выделяет границы не так чётко, как оператор Кэнни, но при этом он придаёт им эффект объёмности, что может быть полезным в определённых применениях.

В ситуации с фильтром вида (3) по рис. 2 видим, что свою функцию он выполняет, но несколько хуже, чем фильтр (2): выделенные края довольно размыты. Причиной этому может быть его относительная простота. Несмотря на это, в случае простого изображения, как на рис. 1, этот фильтр полезен, так как разница в результатах не так велика.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе моделирования оптического выделения границ был разработан алгоритм поиска оптимальных параметров кольцевого и вихревого пространственных фильтров для заданного изображения. Достоинствами алгоритма являются предоставление возможности настройки SLM под входное изображение, а также вычисление результата с довольно малым СКО, например, для приведённого сложного тестового изображения: $\sigma = 0,0688$ в случае кольцевого фильтра и $\sigma = 0,0627$ в случае вихревого. Недостатками являются поиск параметров только для заданного изображения и довольно долгое выполнение, например, для того же изображения оно занимает 74,5 секунды при вычислении параметров для обоих фильтров. Одним из результатов данной работы стало установление факта, что вихревой фильтр с оптимальными параметрами несильно уступает оператору Кэнни.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках СЧ НИР «Исследования в интересах создания многофункционального аналогового фотонного вычислительного устройства на основе схемы Фурье-коррелятора и динамических пространственных модуляторов света» РФЯЦ-ВНИИЭФ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ambs, P. Optical Computing: A 60-Year Adventure / P. Ambs // Adv. Opt. Technol. – 2010. – Vol. 2010. – P. 372652
- [2] Kazanskiy, N.L. Optical Computing: Status and Perspectives / N.L. Kazanskiy, M.A. Butt, S.N. Khonina // Nanomaterials. – 2022. – Vol. 12. – P. 2171.
- [3] Yelleswarapu, C.S. Optical Fourier techniques for medical image processing and phase contrast imaging / C.S. Yelleswarapu, S.-R. Kothapalli, D.V.G.L.N. Rao // Optics Communications. – 2008. – Vol. 281. – P. 1876–1888
- [4] Ананьин, М.А. Моделирование оптической обработки изображений с использованием вихревого пространственного фильтра / М.А. Ананьин, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, №4. – С. 466–472.
- [5] Khonina, S.N. The phase rotor filter / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, M.V. Shinkaryev, V.A. Soifer, G.V. Uspleniev // J. Modern Optics. – 1992. – Vol. 39(5)– P. 1147–1154
- [6] Davis, J.A. Image processing with the radial Hilbert transform: theory and experiments / J.A. Davis, D.E. McNamara, D. Cottrell, J. Campos // Optics Letters. – 2000. – Vol. 25(2) – P. 99–101.
- [7] Heise, B. Enhancing of Structures in Coherence Probe Microscopy Imaging / B. Heise, S.E. Schausberger, C. Maurer-Grubinger [et al.] // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2012. – Vol. 8335. – P.15.
- [8] Guo, C.-S. Radial Hilbert transform with Laguerre–Gaussian spatial filters / C.-S. Guo, Y.-J. Han, J.-B. Xu, J. Ding // Optics letters. – 2006. – Vol. 31(10). – P. 1394–1396.
- [9] Zhou, Y. Image edge enhancement using Airy spiral phase filter / Y. Zhou, S. Feng, S. Nie [et al.] // Optics express. – 2016. – Vol. 24(22). – P. 25258–25268.
- [10] Canny, J. A Computational Approach To Edge Detection / J. Canny // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1986. – 8(6). – P. 679–698.