

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИХРЕВОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО ФИЛЬТРА

Михаил Александрович Ананьин¹ (аспирант, e-mail: ananin@smr.ru),

Светлана Николаевна Хонина^{1,2} (ведущий научный сотрудник, профессор, e-mail: khonina@smr.ru)

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева,

²Учреждение Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН

Аннотация

Вихревой пространственный фазовый фильтр использован для выполнения радиального преобразования Гильберта, которое в отличие от обычно используемых в обработке изображений двумерных преобразований Гильберта является изотропным. Показано существенное увеличение контраста при использовании вихревого фильтра, в том числе по сравнению с фильтром высоких частот. 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 – интерференционных картин фазовых объектов, учитывающих направление изменения фазовой функции. Показана эффективность применения вихревого фильтра для анализа прозрачных объектов, имеющих включения с различной оптической плотностью.

Ключевые слова: вихревой пространственный фильтр, преобразование Гильберта, повышение контраста, визуализация прозрачных объектов, спираллограммы, псевдорельеф.

Введение

Комплексный сигнал был введён Габором в 1946 году [1], он стал важным инструментом в обработке одномерных сигналов, который используется в различных приложениях, таких как кодирование информации (фазовая и частотная модуляции), радиолокационная технология обнаружения объектов, обработка сейсмических данных [2], распознавание речи, проектирование аэродинамических поверхностей [3, 4] и др.

Комплексный сигнал строился подавлением всех отрицательных частот исходного действительного сигнала, что можно представить как сумму данного одномерного сигнала и чисто комплексной составляющей – преобразования Гильберта исходного сигнала. Преобразование Гильберта производит фазовый сдвиг сигнала на $-\pi/2$. Локальная амплитуда (огibaющая) и локальная фаза исходного сигнала являются соответственно модулем и аргументом комплексного сигнала. В настоящее время часто используют термин «аналитический сигнал», вместо термина «комплексный сигнал», который изначально использовал Габор.

1. Одномерное преобразование Гильберта

Рассмотрим функцию $f(x) \in \mathbf{R}$, её свёртка с ядром $h(x) = 1/\pi x$ даст нам преобразование Гильберта $f_H(x)$ исходной функции:

$$f_H(x) = \text{v.p.} \int_{-\infty}^{\infty} h(x-\tau) f(\tau) d\tau. \quad (1)$$

Отметим, что свёртка вычисляется в смысле главного значения интеграла по Коши. Фурье-образ $h(x)$ представляет собой функцию вида:

$$H(\xi) = i \operatorname{sgn}(\xi). \quad (2)$$

Используя (2), запишем выражение (1) в области пространственных частот:

$$F_H(\xi) = i \operatorname{sgn}(\xi) F(\xi), \quad (3)$$

где $F(\xi)$ и $F_H(\xi)$ Фурье-образы $f(x)$ и $f_H(x)$ соответственно.

2. Двумерное преобразование Гильберта

Существует ряд обобщений преобразования Гильберта на многомерный случай, большинство из них обладают теми или иными недостатками. Рассмотрим основные двумерные обобщения преобразования Гильберта.

Частичное преобразование Гильберта. Данное преобразование производится разделением спектра сигнала на две полуплоскости, определяемые вектором предпочитаемого направления $(n_1, n_2)^T$ [5]:

$$H_P(\xi, \eta) = i \operatorname{sgn}(n_1 \xi + n_2 \eta). \quad (4)$$

Частным случаем данного преобразования является преобразование по одной из осей координат. Главным недостатком является отсутствие изотропности преобразования.

Полное преобразование Гильберта. Преобразование строится последовательным применением частичного преобразования Гильберта по обеим осям [6]:

$$H_F(\xi, \eta) = -\operatorname{sgn}(\xi) \operatorname{sgn}(\eta). \quad (5)$$

Данное преобразование не является адекватным обобщением одномерного преобразования Гильберта, так как не создаёт сдвига фазы на $-\pi/2$.

Комбинация полного и частичных преобразований Гильберта в частотной области создаёт аналитический сигнал, отличный от нуля в одном квадранте [6]:

$$H_Q(\xi, \eta) = i(\operatorname{sgn}(\xi) + \operatorname{sgn}(\eta) + \operatorname{sgn}(\xi) \operatorname{sgn}(\eta)). \quad (6)$$

Данное преобразование не является изотропным.

Комбинация полного и частичных преобразований Гильберта с использованием преобразования Фурье в поле кватернионов. Данный подход подробно рассмотрен в [7]; не является изотропным.

Описанные выше преобразования основаны на расширении функции знака с одномерного случая на двумерный, что приводит к потере важного для обработки изображений свойства – изотропности. Другой путь избрали в работах [8, 9], авторы сосредоточились на создании изотропного преобразования Гильберта и применили его для улучшения качества цифровых изображений

Двумерное преобразование Рисса. Представляет собой преобразование, результатом которого является векторная функция векторного аргумента. В спектральной области ядро данного преобразования можно условно записать как [8]:

$$H_r(\xi, \eta) = i \frac{(\xi, \eta)^T}{|(\xi, \eta)^T|}. \quad (7)$$

Отметим, что данное преобразование требует дополнительной интерпретации.

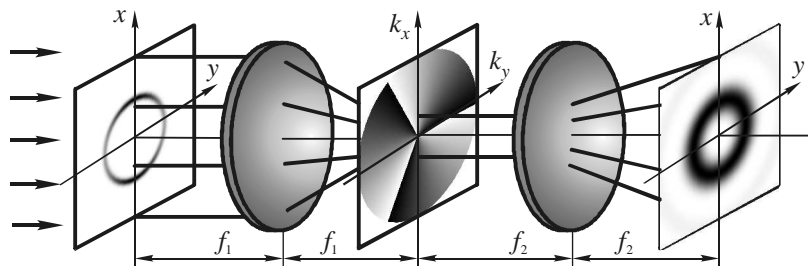


Рис. 1. Схема оптической реализации двумерного преобразования Гильберта

Ниже представлены результаты численного моделирования данной оптической системы.

Рассмотрим различные варианты выполнения двумерных обобщений преобразования Гильберта (таблица 1) оптическим способом для тестового изображения (рис. 2).

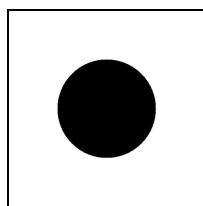


Рис. 2. Тестовое изображение

Под номерами 1 и 2 представлены результаты обработки частичным преобразованием Гильберта (4), выражения для фильтра можно записать, соответственно, в виде:

$$H_{p_0}(\xi, \eta) = i \operatorname{sgn}(\xi), \quad (9)$$

$$H_{p_{\text{es}}}(\xi, \eta) = i \operatorname{sgn}(\xi + \eta). \quad (10)$$

Под номером 3 представлены результаты обработки фильтром, математическое выражение для которого можно представить в комплексной форме следующим образом:

Радиальное преобразование Гильберта. Данное преобразование может быть получено из преобразования Рисса скалярным умножением первого на вектор $(-i, 1)^T$. По сути, ядро данного преобразования представляет собой спираль (вотекс) [9, 10], данное преобразование удобнее записывать в полярной системе координат:

$$H_v(r, \varphi) = \exp(i\varphi), \quad (8)$$

где $\xi = r \cos \varphi$ и $\eta = r \sin \varphi$.

Важно отметить, что данные преобразования создают эффект фазового сдвига.

2. Оптический способ выполнения преобразования Гильберта

Оптически реализовать двумерное преобразование Гильберта возможно с помощью конфокальной схемы, представленной на рис. 1, где левая и правая собирающие линзы имеют соответственно фокусные расстояния f_1 и f_2 , входное изображение помещается в плоскость Oxy , в плоскости Ok_xk_y ставится пространственный оптический фильтр, а в плоскости OXY регистрируется выходное изображение.

$$H_p(\xi, \eta) = i \operatorname{sgn}(\xi\eta). \quad (11)$$

Под номером 4 представлены результаты обработки с применением радиального преобразования Гильберта (8).

Отметим, что преобразования с использованием фильтров (9), (10) и (11) не изотропны в отличие от радиального преобразования Гильберта.

Так как все рассмотренные фильтры являются чисто фазовыми, то их использование позволит снизить энергетические потери при физической реализации. Важным свойством данных типов фильтров является подчёркивание границ объектов.

3. Применение преобразования Гильберта на изображении препарата крови

В работе проводились исследования описанного способа фильтрации применительно к изображениям препарата крови (таблица 2). Результаты обработки фрагмента изображения препарата крови (рис. 3) фильтрами вида (9), (10), (11) и (8), аналогично предыдущему разделу, представлены под номерами с первого по четвёртый в таблице 2, изображения во второй колонке были получены с блокированием центральной части спектра, соответствующей фону изображения.

Таблица 1. Примеры выполнения двумерных обобщений преобразования Гильберта для тестового изображения

№	Фаза фильтра	Интенсивность на выходе
1		
2		
3		
4		

Применение радиального преобразования Гильберта позволяет выделить границы форменных элементов крови и увеличить контраст, что является важным для дальнейшего анализа данного класса изображений [11]. Контраст исходного и обработанного изображений определялся по следующей формуле:

$$k = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}}$$

где I_{\min} и I_{\max} соответственно минимальная и максимальная интенсивность изображения.

Для исходного изображения контраст k был равен 0,297. После применения радиального преобразования Гильберта контраст k увеличился до 0,958.

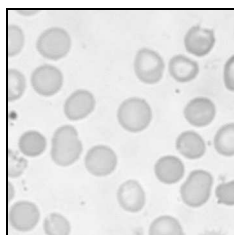


Рис. 3. Исходное изображение препарата крови

При этом в отличие от линейного контрастирования существенного увеличения шума на изображении не наблюдается. Важно, что увеличение контраста получено с использованием оптической схемы с чисто фазовыми элементами, а значит, без существенных потерь энергии.

Таблица 2. Примеры выполнения двумерных обобщений преобразования Гильберта для изображения препарата крови

№	Интенсивность на выходе	Интенсивность на выходе (с блокированием центрального отсчёта)
1		
2		
3		
4		

4. Контрастирование рентгенографических изображений

Проведены эксперименты с использованием рентгенографического изображения черепа. На рис. 4 представлен пример изображения черепа, квадратом выделена область обработки, четыре яркие точки – маркеры протеза, задающие систему координат; протяжённый объект – инородное тело, залегающее в полости глаза. Важной задачей является выделение границы инородного тела и маркеров. Данная рентгенограмма характеризуется слабой контрастностью, и повышение контраста, которое было продемонстрировано в предыдущем разделе, в этом случае особенно актуально. В частности, контраст k представленной рентгенограммы (рис.4) составляет 0,12.

После обработки фильтром высоких частот контраст k можно повысить до 0,75, а совместное при-

менение фильтра высоких частот и предложенного вихревого фильтра увеличивает контраст k до 0,857 (рис. 5а). Было проведено моделирование: формировалось комплексное распределение, в котором в качестве фазовой функции использовался обрабатываемый фрагмент (рис.4), а амплитуда считалась постоянной. В данном случае контраст k был увеличен до 0,888 (рис. 5б).

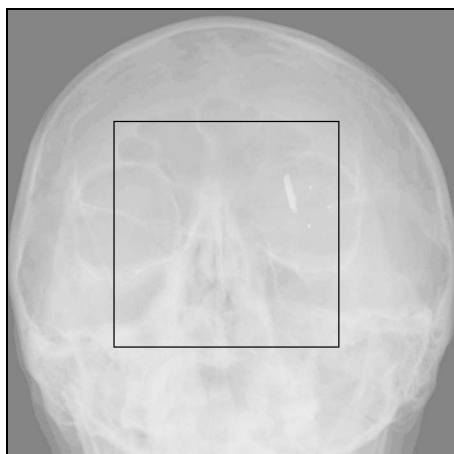


Рис. 4. Изображение рентгенограммы черепа, рамкой выделен обрабатываемый фрагмент

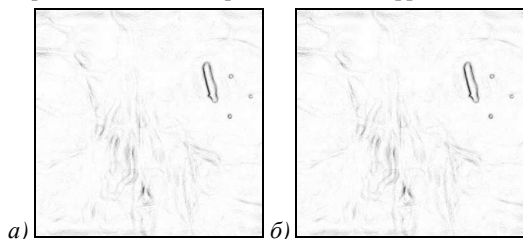


Рис. 5. Результат обработки рентгенограммы, где фрагмент рассматривается а) как амплитуда, б) как фаза при постоянной амплитуде

5. Формирование псевдорельефных изображений

В работе [12] предложено заменить центральную часть вихревого пространственного фильтра на постоянное значение. В этом случае формируется псевдорельефное изображение, облегчающее визуальное наблюдение мелких деталей изображения.

На рис. 6 показан вид комбинированного вихревого фильтра и псевдорельефное изображение для центральной части рентгеновского снимка (рис.4). В этом случае хорошо выделяется одна из границ инородного объекта. Картина выглядит рельефной и как бы освещаемой дополнительным источником света.

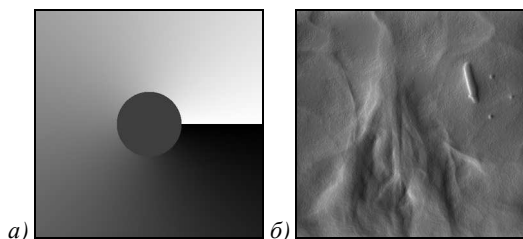


Рис. 6. Вид комбинированного вихревого фильтра (а) и псевдорельефное изображение для центральной части рентгеновского снимка (б)

Если постоянное значение в центральной части фильтра динамически менять, что возможно при использовании жидкокристаллических транспарантов, то картина в псевдорельефном изображении будет меняться, как если бы перемещался источник освещения. При этом одни детали затеняются, а другие, наоборот, подчеркиваются (рис. 7).

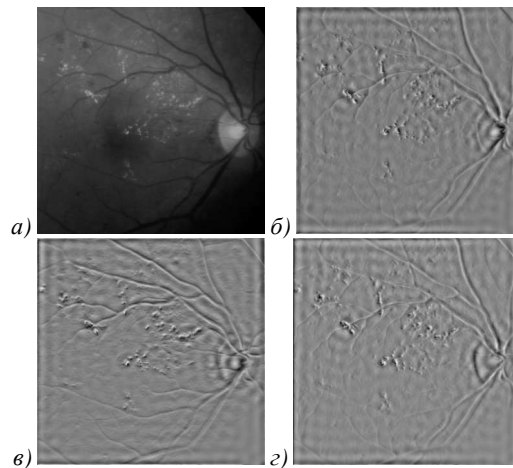


Рис. 7. Снимок глазного дна (а) и псевдорельефные картины при изменении центральной значения постоянной фазы в вихревом фильтре: 0 (б), $\pi/2$ (в), π (г)

Таким образом, с одной стороны, можно в режиме реального времени просканировать изображение при различных ракурсах, с другой стороны, если оптический элемент статичный, то можно выделять (визуально подчеркивать) протяжённые объекты определённого направления, что актуально, например, для [13].

Вопрос, касающийся размеров центральной части комбинированного фильтра, выходит за рамки данной статьи и является предметом дополнительных исследований.

6. Построение спираллограмм

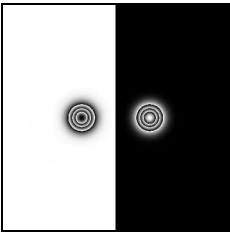
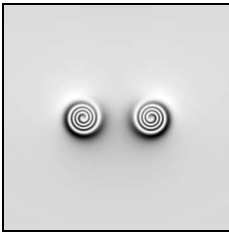
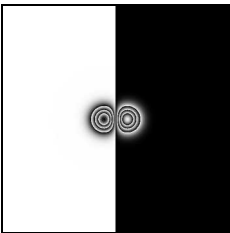
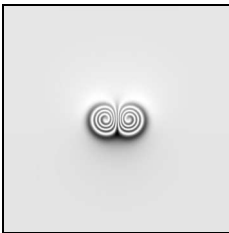
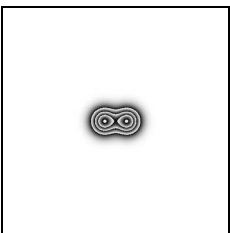

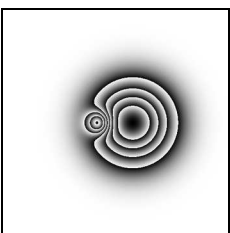
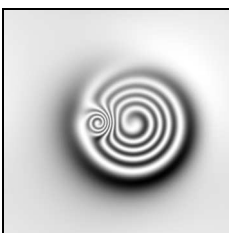
При работе с прозрачными объектами, такими как полистироловые шарики в жидкости, существует проблема визуализации, т.к. получаемые изображения слабоконтрастны. Построение интерферограмм позволяет зарегистрировать фазу данных объектов, но возникает неоднозначность – объекты, которые отличаются по оптической плотности на одинаковую величину от плотности окружающей среды, дают одинаковую картину интерференции. В данном случае решением может стать построение спираллограмм [14].

Для построения спираллограмм возможно применение оптической системы, описанной выше (рис. 1): считается, что в плоскость объекта пришёл равномерный плоскопараллельный пучок от когерентного источника света, т.е. входное изображение можно считать чисто фазовым; в спектральной плоскости поместим фильтр (8) с топологическим зарядом, равным 1. При этом в качестве опорного пучка используется излучение, прошедшее через центральную часть фильтра, а спиральность образуется за счёт вихревых свойств фильтра.

В таблице 3 представлены результаты моделирования: в качестве входного поля формировалось комплексное распределение с постоянной амплитудой и фазой вида:

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^2 \pi A_i \exp\left(-\frac{(x-a_i)^2 + y^2}{2\sigma_i^2}\right). \quad (12)$$

Таблица 3. Результаты моделирования формирования спираллограмм для фазовой функции вида (12)

№	Вид фазовой функции $f(x, y)$	Интенсивность на выходе
	$(A_1; A_2; \sigma_1^2; \sigma_2^2; a_1; a_2) = (-8; 8; 0,005; 0,005; -0,3; 0,3)$	
1		
	$(A_1; A_2; \sigma_1^2; \sigma_2^2; a_1; a_2) = (-8; 8; 0,005; 0,005; -0,1; 0,1)$	
2		
	$(A_1; A_2; \sigma_1^2; \sigma_2^2; a_1; a_2) = (8; 8; 0,005; 0,005; -0,1; 0,1)$	
3		
	$(A_1; A_2; \sigma_1^2; \sigma_2^2; a_1; a_2) = (-8; 10; 0,005; 0,05; -0,15; 0,15)$	
4		

Значения параметров $A_1, A_2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, a_1$ и a_2 функции (12) приведены над соответствующими изображениями в таблице 3.

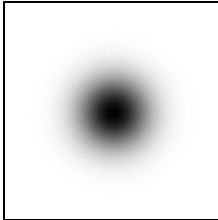

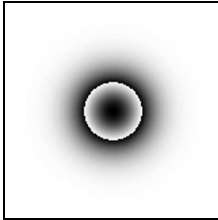
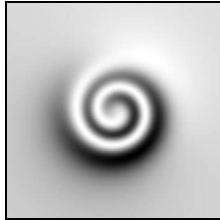
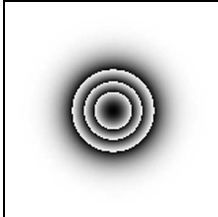
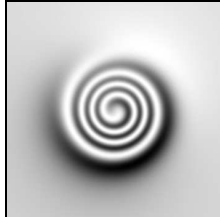
Отметим, что направления закруток спираллограмм в данном случае определяются знаками параметров A_1 и A_2 . В общем случае для выпуклых объектов по направлению закрутки можно определить, является ли оптическая плотность объекта больше оптической плотности окружающей среды либо меньше. Например, пузырьки воздуха в жидкости не будут визуально отличаться от полистироловых шариков, находящихся в той же жидкости. Также методы интерферометрии не позволяют различить эти два типа объектов в связи примерно одинаковой абсолютной разностью оптических плотностей объектов и окружающей среды.

В таблице 4 представлены результаты моделирования спираллограмм для фазовой функции, имеющей вид:

$$f(x, y) = \pi A \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{0,01}\right). \quad (13)$$

Значение параметра A для строк с первой по третью соответственно равно 2, 4 и 8. Результаты экспериментов показали, что количество витков спиралей на спираллограммах прямо пропорционально кратности набега фазы.

Таблица 4. Результаты моделирования формирования спираллограмм для фазовой функции вида (13)

№	Фазовый рельеф	Интенсивность на выходе
1		
2		
3		

Дополнительно было проведена серия экспериментов с фазовым фильтром вида [15]:

$$H_m(r, \varphi) = \exp(im\varphi). \quad (14)$$

При $m = 1$, выражение (14) тождественно (8).

Примеры спираллограмм для разных значений m представлены в таблице 5, в качестве входного использовалось изображение с равномерным освещением и фазовой функцией вида (12) с параметрами $(A_1; A_2; \sigma_1^2; \sigma_2^2; a_1; a_2) = (-8; 8; 0,005; 0,005; -0,3; 0,3)$.

Таблица 5. Результаты моделирования формирования спираллограмм для фазовой функции вида (12) и фильтра вида (14)

m	Вид фильтра	Интенсивность на выходе
0,5		
1		
1,5		
2		
2,5		
5		

В ходе проведённых исследований было установлено, что «непрерывные» витки спиралей образуются только для натуральных значений m , при этом количество спиралей увеличивается прямо пропорционально значению этого параметра. При дробных значениях параметра m на спиралях образуются разрывы.

Заключение

В данной статье рассмотрены варианты обобщений одномерного преобразования Гильберта на двумерный случай и их основные характеристики. Описан оптический способ выполнения двумерного преобразования Гильберта. Для оптической реализации изотропного двумерного (радиального) преобразования Гильберта применяется пространственный вихревой сингулярный фильтр.

На примерах обработки рентгенографических снимков, изображений препарата крови и глазного дна показаны возможность и целесообразность применения радиального преобразования Гильберта для улучшения качества изображений. В частности, существенное увеличение контраста, в том числе по сравнению с фильтром высоких частот, выделение деталей на изображениях, формирование псевдорельефных изображений для визуального выделения протяжённых объектов различных направлений.

Приведены результаты исследований применимости метода построения спираллограмм. Основные результаты исследований получены способом математического моделирования.

Вихревые фильтры с различными порядками сингулярности (в том числе и дробными) применены для построения спираллограмм, которые представляют собой аналог интерференционных картин фазовых объектов, но дополнительно сохраняющих информацию о направлении изменения фазовой функции.

В общем случае для выпуклых объектов по направлению закрутки можно определить, является ли оптическая плотность объекта больше оптической плотности окружающей среды либо меньше.

Результаты численных экспериментов показали, что количество витков спиралей на спираллограммах пропорционально кратности набега фазы.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF PG08-014-1), программы Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине», гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-3086.2008.9) и гранта РФФИ 08-07-99007.

Литература

1. Theory of communication / D. Gabor // J. Inst. Elect. Eng. – 1946. – vol. 93. – P. 429–457.
2. Multiattribute processing of seismic data: Application to dip displays / B. Milkereit, C. Spencer // Canadian Journal of Exploration Geophysics 26, 1 & 2. – December 1990. – P. 47–53.
3. An extension of the Hilbert transform product theorem / H. Stark. // Proc. IEEE, – 1971. – vol. 59, Issue 959. – P. 1359–1360.
4. Zayed, A. I. Handbook of Function and Generalized Function Transformations / A. I. Zayed – Mathematical Science Reference Series. CRC Press, Boca Raton, 1996. – 643 pp.
5. Granlund, G. H. Signal Processing for Computer Vision / G. H. Granlund, H. Knutsson – Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995. – 437 pp.

6. **Hahn, S. L.** Hilbert Transforms in Signal Processing / S. L. Hahn – Artech House, Boston, London, 1996. – 305 pp.
7. **Bülow, T.** Hypercomplex Spectral Signal Representations for the Processing and Analysis of Images / T. Bülow – PhD thesis, Christian-Albrechts-University of Kiel, 1999. – 161 pp.
8. Die Hilberttransformation und ihre Verallgemeinerung in Optik und Bildverarbeitung / R. MÜLLER, J. MARQUARD // Optik / – 1999 – Vol. 110, N 2. – pp. 99-109. – ISSN 0030-4026.
9. **Davis, J. A.** Image processing with the radial Hilbert transform: theory and experiments / J. A. Davis, D. E. McNamara, D. Cottrel, J. Campos // Optics Letters 2000. – Vol. 25, No. 2 – P. 99-101.
10. **Cheng-Shan Guo** Radial Hilbert transform with Laguerre–Gaussian spatial filters / Cheng-Shan Guo, Yu-Jing Han, Jian-Bo Xu, Jianping Ding // Optics Letters. – 2006. – Vol. 31, No. 10 – P. 1394-1396.
11. **Жулькова, Е.С.** Технология выделения лейкоцитов на изображениях препаратов крови / Е.С. Жулькова, Н.Ю. Ильясова, А.В. Куприянов // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 31, №2, – С. 77-81. – ISSN 0134-2452.
12. Jesacher, A. Shadow Effects in Spiral Phase Contrast Microscopy / Alexander Jesacher, SeverinFurhapter, Stefan Bernet, and Monika Ritsch-Marte // Phys. Rev. Lett. – 2005. – Vol. 94, Issue 23 – P. 233902-1-233902-4
13. **Корепанов, А.О.** Формирование признакового пространства на основе оценивания кривизны центральных линий сосудов в задаче анализа патологических изменений структуры сосудистой системы глазного дна / А.О. Корепанов, М.А. Ананьин // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 31, №1, – С. 52-57. – ISSN 0134-2452.
14. **Maurer, C.** Refining common path interferometry with a spiral phase Fourier filter / Christian Maurer, Stefan Bernetand, Monika Ritsch-Marte // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2009. – Vol. 11 – P. 094023-1-094023-7.
15. **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, Issue 5– P. 1147-1154.
3. An extension of the Hilbert transform product theorem / H. Stark. // Proc. IEEE, – 1971. – vol. 59, Issue 959. – P. 1359-1360.
4. **Zayed, A. I.** Handbook of Function and Generalized Function Transformations / A. I. Zayed – Mathematical Science Reference Series. CRC Press, Boca Raton, 1996. – 643 pp.
5. **Granlund, G. H.** Signal Processing for Computer Vision / G. H. Granlund, H. Knutsson – Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995. – 437 pp.
6. **Hahn, S. L.** Hilbert Transforms in Signal Processing / S. L. Hahn – Artech House, Boston, London, 1996. – 305 pp.
7. **Bülow, T.** Hypercomplex Spectral Signal Representations for the Processing and Analysis of Images / T. Bülow – PhD thesis, Christian-Albrechts-University of Kiel, 1999. – 161 pp.
8. Die Hilberttransformation und ihre Verallgemeinerung in Optik und Bildverarbeitung / R. MÜLLER, J. MARQUARD // Optik / – 1999 – Vol. 110, N 2. – pp. 99-109. – ISSN 0030-4026.
9. **Davis, J. A.** Image processing with the radial Hilbert transform: theory and experiments / J. A. Davis, D. E. McNamara, D. Cottrel, J. Campos // Optics Letters. – 2000. – Vol. 25, No. 2 – P. 99-101.
10. **Cheng-Shan Guo** Radial Hilbert transform with Laguerre–Gaussian spatial filters / Cheng-Shan Guo, Yu-Jing Han, Jian-Bo Xu, Jianping Ding // Optics Letters. – 2006. – Vol. 31, No. 10 – P. 1394-1396.
11. **Zhulkova, E.S.** Technology of leukocytes detecting in images of blood products / E.S. Zhulkova, N.Y. Ilyasova, A.V. Kupriyanov // Computer Optics. – 2007. – Vol. 31, №2, – P. 77-81. – ISSN 0134-2452. – (in Russian).
12. Jesacher, A. Shadow Effects in Spiral Phase Contrast Microscopy / Alexander Jesacher, SeverinFurhapter, Stefan Bernet, and Monika Ritsch-Marte // Phys. Rev. Lett. – 2005. – Vol. 94, Issue 23 – P. 233902-1-233902-4
13. **Korepanov, A.O.** Formation of feature space based on estimation of curvature of vessel’s central lines in problem of analysis of pathological changes in fundus vascular system / A.O. Korepanov, M.A. Ananin // Computer Optics. – 2007. – Vol. 31, №1, – P. 52-57. – ISSN 0134-2452. – (in Russian).
14. **Maurer, C.** Refining common path interferometry with a spiral phase Fourier filter / Christian Maurer, Stefan Bernetand, Monika Ritsch-Marte // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2009. – Vol. 11 – P. 094023-1-094023-7.
15. **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, Issue 5– P. 1147-1154.

References

1. Theory of communication / D. Gabor // J. Inst. Elect. Eng. – 1946. – vol. 93. – P. 429–457.
2. Multiattribute processing of seismic data: Application to dip displays / B. Milkereit, C. Spencer // Canadian Journal of Exploration Geophysics 26, 1 & 2. – December 1990. – P. 47–53.

MODELLING OF OPTICAL PROCESSING OF IMAGES WITH USE OF THE VORTICAL SPATIAL FILTER

Michael Alexandrovich Ananin¹ (post-graduate, e-mail: ananin@smr.ru),
Svetlana Nikolaevna Khonina^{1,2} (leading researcher, professor, e-mail: khonina@smr.ru)

¹S.P. Korolyov Samara State Aerospace University

²Institution of Russian Academy of Sciences, Image Processing Systems Institute RAS

Abstract

The vortical spatial phase filter is used for performance of radial Hilbert transform which is isotropic in contrast to usually used in image processing 2D Hilbert transforms. The essential increase in contrast is shown at use of the vortical filter, also in comparison with the filter of high frequencies. Formation of pseudo-relief images for visual accentuation of objects elongated in various directions is possible if small modification of the central part of the considered filter is done. The similar filter is used for construction of spiral interferograms - interference pattern of the phase objects considering a direction of phase function change. Efficiency of vortical filter application for the analysis of the transparent objects having inclusions with various optical density is shown.

Key words: vortical spatial filter, Hilbert transform, contrast increase, visualisation of transparent objects, spiral interferograms, pseudo-relief.

Поступила в редакцию 12.11.2009 г.