

ИЗОБРАЖАЮЩИЙ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТР НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ, ВЫПОЛНЯЮЩЕЙ КОЛЬЦЕВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ РАДОНА

© 2015 Р.В. Скиданов^{1,2}, В.А. Бланк²

¹ Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара

² Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 16.03.2015

Рассмотрена возможность использования аксикона нулевого порядка в изображающем гиперспектрометре. Проведено моделирование гиперспектрометра в рамках геометрической и волновой оптики. *Ключевые слова:* аксикон нулевого порядка, изображающий гиперспектрометр, функция рассеяния точки.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие методов изображающей спектроскопии в последнее время породило огромное количество конструкций изображающих гиперспектрометров [1-2]. Изображающие гиперспектрометры строятся на основе использования спектральных фильтров, дифракционных решеток, призм. Перечень областей применения гиперспектропии включает медицинскую диагностику на основе анализа гиперспектральных изображений органов, тканей, клеток и т.п., спектроскопию одиночных квантовых объектов, астрономические исследования [3-5].

В качестве диспергирующего элемента в спектрометре может использоваться как призма, так и дифракционная решетка [6]. При этом спектральное разрешение таких приборов всегда на один два порядка хуже, чем разрешение обычных спектрометров. Связано это, в первую очередь, с тем, что в изображающих гиперспектрометрах используются существенно более слабые диспергирующие элементы. Так если число линий на миллиметр в дифракционной решетке обычного спектрометра составляет от нескольких сотен до нескольких тысяч, то в изображающих гиперспектрометрах обычно используются решетки, в которых не более нескольких десятков линий на миллиметр. К сожалению, резкое увеличение абберационных искажений из-за использования дифракционной решетки, не позволяет использовать в изображающих гиперспектрометрах более высокочастотные решетки. Это уширение можно нивелировать за счет использования дифракционных решеток на криволинейных поверхностях, например в [7] спектрометр основан на конфигурации Оффне-

Скиданов Роман Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией микро- и нанотехнологий. E-mail: romans@smr.ru
Бланк Вероника Александровна, студентка. E-mail: veronika_b@smr.ru

ра, включающей два концентрических зеркала и сферическую дифракционную решетку. В [8] используется спектрометр Дайсона, состоящего из линзы из кварцевого стекла и вогнутой решетки. Но такой подход ведет к усложнению технологии изготовления дифракционных решеток. С точки зрения авторов, принципиальная причина дифракционных искажений в гиперспектрометрах с дифракционной решеткой, это использование в осесимметричной оптической системе двух элементов, такой симметрией не обладающих: дифракционная решетка и щелевая диафрагма.

В данной работе предлагается использовать вместо дифракционной решетки дифракционный аксикон, а так же диафрагму в форме узкого кольца.

Дифракционный аксикон представляет собой дифракционную решетку, состоящую из штрихов в форме концентрических окружностей [9, 10]. Попытки использовать аксикон в изображающих системах делаются достаточно давно [11].

Как было показано в [12, 13], оптическая схема в виде Фурье коррелятора с аксиконом в частотной плоскости реализует кольцевое преобразование Радона. Т.е. на выходе Фурье коррелятора будет сформирован Радон-образ исходного изображения. Там же в [12, 13] было показано, что Радон-образ произвольной кривой точно повторяет ее форму. Попробуем в данной работе рассмотреть это свойство кольцевого преобразования радона применительно к построению гиперспектральных изображений.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Использование оптической системы с аксиконом в частотной плоскости выглядит парадоксально, т.к. функция размытия точки (ФРТ) является кольцом (рис. 1).

Однако если, например, рассматривать не одиночную точку, а линию, то после прохождения оптической системы с аксиконом она



Рис. 1. ФРТ для Фурье-коррелятора с аксиконом в частотной плоскости

превращается в две линии. Это также следует из [11]. Т.е. аксикон, установленный в частотной плоскости Фурье-коррелятора, работает почти как дифракционная решетка (рис. 2). На рис. 2а, б представлены изображения короткой и длинной световых линий. На рис. 2в, г их Радон-образы, соответственно.

Как видно из рис. 2, с увеличением длины линии Радон-образ все более качественно воспроизводит линию.

К сожалению, модуляционные особенности на прямой линии передаются в ее Радон-образе не очень хорошо (рис. 3).

Как видно из рис. 3 Радон-образ слабо передает модуляционные особенности на линии, что и следовало ожидать, поскольку линейная щель не является осесимметричным элементом.

Очевидно, что для хорошей работы предложенной конфигурации необходимо сделать

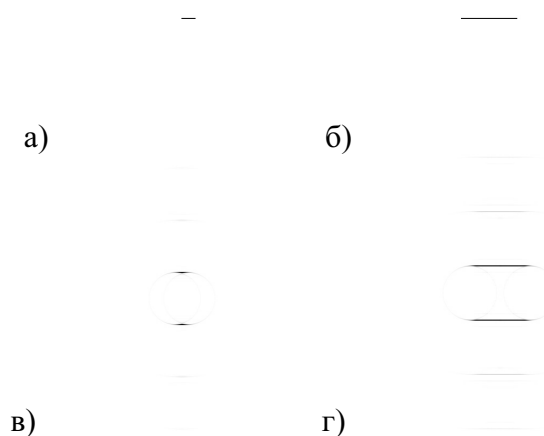


Рис. 2. Изображение светящихся линий и их Радон-образы

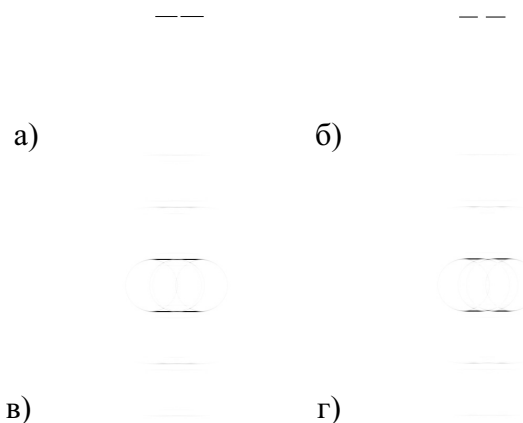


Рис. 3. Светящаяся линия с разрывом 3 пиксела (а) и с разрывом в 10 пикселов (б), их Радон-образы соответственно (в, г)

щелевую диафрагму осесимметричной, т.е. в форме кольца или полукольца. Радон-образ кольца (рис. 4а) будет выглядеть как два кольца (рис. 4в), разделенных промежутком, величина которого зависит от периода аксикона. При модуляции на исходном кольце (рис. 4б), она хорошо воспроизводится на его Радон-образе (рис. 4г).

Как видно из рис. 4 качество воспроизведения модуляции в Радон-образе кольцевой щели позволяет предположить, что на основе такого Радон-образа можно будет качественно сформировать изображение.

Как показано в [11, 12] Радон-образ от изображения более сложного, чем линия очень сильно искажен по сравнению с исходным изображением. Однако при построении гиперспектральных изображений всегда используется щелевая диафрагма, т.е. при использовании кольцевой диафрагмы мы будем сканировать этой диафрагмой

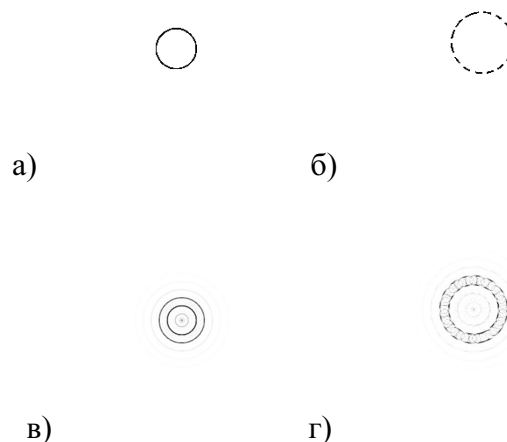


Рис. 4. Непрерывное светящееся кольцо (а), модулированное кольцо (б), Радон-образ непрерывного кольца (в), Радон-образ модулированного кольца (г)

объект и получать на входе модулированной кольцо, которое хорошо воспроизводится в Радон-образе. При этом диаметр колец в Радон-образе будет зависеть от длины волны в исходном световом поле.

Промоделируем процесс построения изображений гиперспектрометром с дифракционным аксиконом для разных длин волн.

На рис. 5 изображена схема установки, где: 1 – щель сканирования, 2,4 – линзы, 3 – аксикон нулевого порядка, 5 – ПЗС камера. В данной схеме использовались линзы с фокусным расстоянием $f = 100$ мм, между ними расположен аксикон, с периодом 25 мкм для длины волны 532 нм. Ширина щели равна 0,05 мм.

Была разработана моделирующая программа, в которой сканирование изображения велось полукруглой щелью, а затем свет проходил через Фурье-коррелятор с фазовым фильтром в виде аксикона нулевого порядка. На рисунке 6а-г показано восстановление чёрно-белых модельных изображений с помощью сканирования полукруглой щелью, на рис. 6а пунктиром выделена область сканирования. При сканировании щелью в форме полукруга, каждый раз на входе в схеме на рис. 5 кривая в форме дуги, которая на выходе схемы преобразуется в Радон-образ в форме двух дуг, каждую из которых можно использовать для восстановления изображения (рис. 6в). На рис. 6д показаны сечения вертикальных и горизонтальных линий соответственно в восстановленном изображении. В качестве единицы измерения выбрана ширина линий в исходном изображении.

Из рис. 6д,е видно, что уширение вертикальных линий незначительно (в 2 раза), что вызвано значительной шириной кольцевой диафрагмы, уширение горизонтальной линии больше (5 раз). Эта разница, очевидно, связана с особенностями алгоритма (сканирование осуществляется по горизонтали). Т.к. в данной оптической системе невозможно использовать ФРТ в качестве критерия качества построения изображения, то можно для этого использовать уширение линии.

Преобразование Фурье позволяет моделировать только монохроматический свет. Для того чтобы рассмотреть как будут изменяться изображения на разных длинах волн было проведено несколько вычислительных экспериментов для разных длин волн, в которых менялся период аксикона, что полностью идентично изменению длины волны.

Таким образом, на рис. 7а изображено исходное полутонное изображение, на 7б изображение восстановлено с длиной волны 450 нм, на 7в – с длиной волны 500 нм, а на 7г – с длиной волны 550 нм.

Для проверки способности данной системы сформировать изображение, содержащее мелкие детали, рассмотрим в качестве такого изображе-

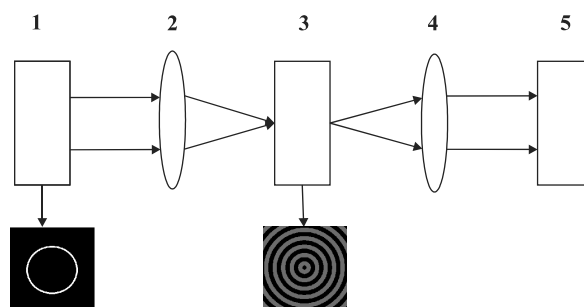


Рис. 5. Схема установки гиперспектрометра с аксиконом

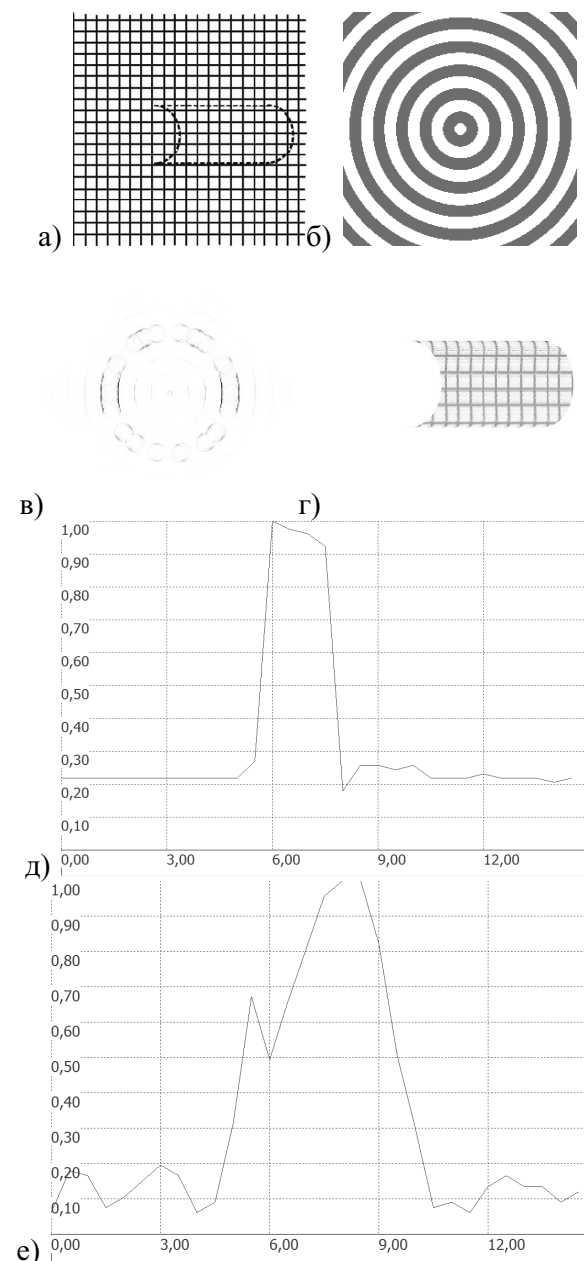


Рис. 6. Восстановление изображения полукруглой щелью:

а – исходное изображение; б – аксикон; в – Радон-образ; г – восстановленное изображение, д – сечение вертикальной линии, е – сечение горизонтальной линии

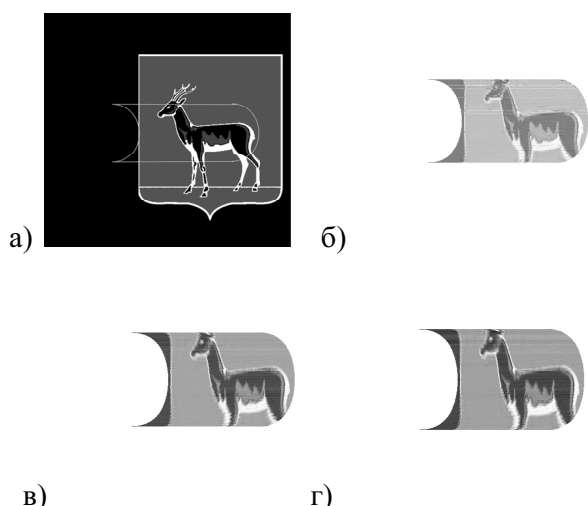


Рис. 7. Восстановление полутонового изображения:
 а – исходное изображение;
 б – восстановленное изображение с длиной волны 450нм;
 в – восстановленное изображение с длиной волны 500нм;
 г – восстановленное изображение с длиной волны 550нм

ния текст, в котором ширина линий сопоставима с шириной щелевой диафрагмы (2 пиксела). На рис. 8а представлен фрагмент текста на входе в оптическую систему, на рис. 8б построенное изображение.

Как видно из рис. 8б построенное изображение сохраняет читаемость текста.

Как видно из рис. 6, рис. 7 и рис. 8 предложенная оптическая схема в целом работает. Восстанавливается форма изображения, если сравнивать изображения по границам погрешность в среднем составляет не более 2 пикселей, т.е. примерно на ширину кольцевой диафрагмы. Компоненты с разной длиной волны пространственно разделяются (рис. 7). Если судить по соотношению ширины линии и расстоянием между кольцами в Радон-образе, в предложенной оптической схеме может быть достигнуто спектральное разрешение в 5-10 нм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проведено моделирование работы гиперспектрометра, использующего в качестве дисперсионного элемента вместо дифракционной решетки дифракционный аксикон, и доказана принципиальная работоспособность такой конфигурации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 14-19-00114).

Счастье есть смысл и назначение жизни, единственная цель человеческого существования.

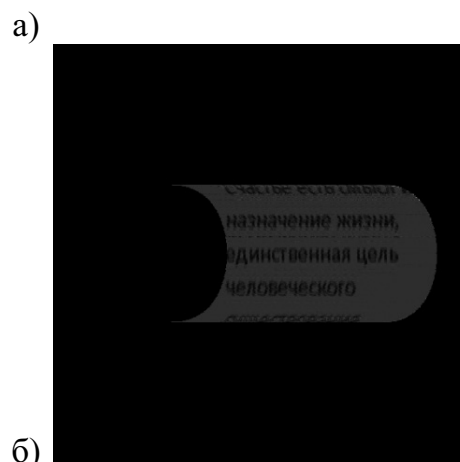


Рис. 8. Построение изображения с текстовым фрагментом:
 а – исходное изображение;
 б – восстановленное изображение

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронай Е.С. Дисперсионный гиперспектрометр с реконфигурируемой входной апертурой на основе микрорезеральной матрицы // Вестник БГУ. 2009. Сер.1. №3. С. 31-35.
2. Tyo J.S. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications // Applied Optics. 2006. V.45. N.22. P. 5453-5469.
3. Gowen A. A. Hyperspectral imaging – an emerging process analytical tool for food quality and safety control // Trends Food Sci. Technology. 2007. V.18. N.12. P. 590-598.
4. Levenson R. M. Multispectral imaging in biology and medicine: Slices of life // Cytometry A. 2006. V. 69. N.8. P. 748-758.
5. Jacques S.L. Imaging skin pathology with polarized light // Biomedical Optics. 2002. V.7. N.3. P. 329-340.
6. Казанский Н.Л. Моделирование гиперспектрометра на спектральных фильтрах с линейно-изменяющимися параметрами // Компьютерная оптика. 2014. Т.38. №2. С. 256-270.
7. Mouroulis P. Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy // Optical Engineering. 2007. V. 46(6). P. 063001-1-9.
8. Reiningger Francis M. Imaging spectrometer/camera having convex grating. Patent No. US 6100974 // Pub. Date: 8.08.2000
9. Хонина С.Н. Применение аксиконов в изображающих системах для увеличения глубины фокуса // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т.13. №6. С. 7-15 .

10. *Burvall A.* Lens axicons in oblique illumination // Applied Optics. 2007. V.46(3). P. 312-318.
11. *Arimoto R.* Imaging properties of axicon in a scanning optical system // Applied Optics. 1992. V. 31. N.31. P.6653-6657.
12. *Котляр В.В.* Кольцевое преобразование Радона // Компьютерная оптика. 2003. Т. 25. С 126-131.
13. *Котляр В.В.* Уравнение для изображающей оптической системы с аксиконом // Автометрия. 2004. Т.40. №3. С. 90-99.

IMAGING HYPERSPECTROMETER BASED SYSTEMS THAT PERFORM THE CIRCULAR RADON TRANSFORM

© 2015 R.V. Skidanov^{1,2}, V.A. Blank²

¹Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara

²Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

We have considered the possibility of using zero order axicon in imaging hyperspectrometer. We carried out a simulation of hyperspectrometer in geometrical and wave optics.

Key words: diffraction optical element, optical vortex, topological charge.