

Количественная визуализация формы физических тел с помощью точно структурированного оптического излучения

А.М. Вин¹, Б.С. Ринкевичус², А.Ю. Пороиков³

humburger49@gmail.com | rinkevbs@mail.ru | poroykovay@gmail.com

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия;

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия;

³Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

В статье предложен и разработан новый оптико-электронный метод количественной визуализации геометрических параметров физических тел с помощью точно структурированного оптического излучения (ТСИ), получаемого от источников когерентного излучения с использованием дифракционных оптических элементов (ДОЭ). В данной статье используется ТСИ в виде прямоугольной сетки точечных равноотстоящих источников излучения с заданными расстояниями между ними. Исследуемые геометрические фигуры устанавливаются на вертикальном экране и освещаются ТСИ. Получаемые изображения регистрируются цифровой фотокамерой с целью определения геометрических параметров исследуемых тел с помощью стандартных алгоритмов обработки. Приведено подробное описание элементов измерительного комплекса, который состоит из источника непрерывного когерентного излучения с длиной волны 0,552 мкм, ДОЭ, формирующего ТСИ в виде квадратной матрицы, соответствующей набору тонких пучков излучения с расстояниями между ними 3,4 мм на дистанции 750 мм до экрана. Также приведено подробное описание методики обработки плоских картин визуализации. Данный метод получения изображения геометрической фигуры отличается от прямого фотографирования тем, что наряду с получением изображения объекта регистрируется информация о расположении точечных источников излучения в составе ТСИ, которая в дальнейшем используется для определения геометрических параметров исследуемой фигуры или проекции физического тела. Основным преимуществом предлагаемого метода является то, что сопоставление с измерительной матрицей происходит на физическом уровне и при обработке изображений не требуется дополнительная калибровка для определения абсолютных геометрических размеров исследуемого тела.

Ключевые слова: точно структурированное оптическое излучение, дифракционный оптический элемент, диффузно рассеивающая поверхность, фотографирование, компьютерная обработка картин визуализации.

Quantitative visualization of physical shapes using point-structured optical radiation

A.M. Win¹, B.S. Rinkevichyus², A. Yu. Poroikov³

humburger49@gmail.com | rinkevbs@mail.ru | poroykovay@gmail.com

¹National Research University "MPEI", Moscow, Russia;

²National Research University "MPEI", Moscow, Russia;

³National Research University "MPEI", Moscow, Russia

This article shows a new electro-optical method for quantitative imaging parameters of physical shapes with the use of point-structured optical radiation (PSR) obtained from the coherent radiation source and diffractive optical elements (DOE). PSR is used in the form of a rectangular grid of point equidistant radiation sources with given distances between them. The physical figures under consideration are mounted on a vertical screen and illuminated by the PSR. The parameters of the figures can be determined from the obtained images using standard processing algorithms. The images of the physical shapes can be photographed with a digital camera and then reproduced on a computer screen with further processing by modern digital methods. There is a detailed description of the measurement system elements, which consists of a continuous coherent radiation source with a wavelength of 0.552 μm, the DOE and a large aperture lens, which enable to receive PSR as a square matrix of thin beams with distances between them of 3.4 mm at a distance of 750 mm up to the screen. Also it is given detailed description of the processing technique of flat visualization picture. This method for obtaining a photographic image of physical shape differs from the standard photographing in the fact that in addition to obtaining an object image is recorded information on the parameters of point radiation sources in the composition of PSR, which is later used to determine the geometric parameters of the physical shapes.

Keywords: point structured optical radiation, diffraction optical element, diffusely scattering surface, photography, computer processing of visualization pictures.

1. Введение

Для качественной и количественной визуализации и определения параметров диффузно рассеивающих исследуемых физических фигур на практике широко используются оптические методы: прямого фотографирования, голографические, интерференционные и ряд других [1-3]. Каждый из этих методов обладает своими особенностями и областью применения.

Методы прямого фотографирования наиболее просты и широко распространены, однако требуют дополнительной

калибровки для получения численных значений геометрических параметров фотографируемых исследуемых физических фигур, интерференционные и голографические методы позволяют получать трехмерную визуализацию, однако сложны в реализации [3].

Для количественной визуализации геометрических параметров диффузно рассеивающих плоских объектов в работах [4, 5] было предложено использовать точно структурированное оптическое излучение (ТСИ), получаемое с помощью дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Дифракционные оптические элементы широко используются в лазерной рефрактографии –

современной измерительной технологии, предназначенной для количественной визуальной диагностики процессов в объеме и пограничных слоях жидкостей [6].

Реализованный принцип измерения параметров диффузно рассеивающих объектов адаптирован для компьютерных методов обработки оптических изображений и позволяет регистрировать параметры объектов с линейными размерами от 1 до 30 см (ограничения связаны с разрешающей способностью и апертурой использованных объективов). Обработка оптических изображений проводится стандартными компьютерными алгоритмами [7].

2. Оптическая система визуализационного комплекса и методы исследования

Разработанный оптико-электронный комплекс для количественной визуализации геометрических параметров диффузно рассеивающих исследуемых физических тел с помощью ТСИ показан на рис. 1.

Источник оптического излучения 1 – монохроматический, работающий на длине волны 0,552 мкм, мощность излучения 20 мВт, исходный диаметр пучка составляет 2 мм, установлен на неподвижном штативе. Дифракционный оптический элемент (ДОЭ) 2 представляет собой круглую пластинку толщиной 1 мм, диаметром 5 мм, укрепленную на регулируемой по высоте стойке. После ДОЭ в результате дифракции когерентного пучка получается 51×51 тонких равноотстоящих микропучков, диаметр которых составляет не более 1 мм.

Оптическая система представляет собой многолинзовый объектив 3 диаметром 75 мм и фокусным расстоянием 750 мм. Объектив установлен на штативе, регулируемом по высоте, углу наклона и положению. Экран представляет собой пластиковую пластину, окрашенную в белый цвет. Регистрация изображений предметов на экране осуществляется цифровым фотоаппаратом с разрешением 0,1 мм.

Для исследования применяются оптико-электронные методы, т. е. методы, в основе которых лежит фотоэлектронное преобразование оптического излучения с последующим измерением параметров электрического сигнала, несущего информацию об оптических характеристиках исследуемых физических тел. Тонкие пучки формируются с помощью ДОЭ и при распространении сохраняют свою заранее заданную поперечную структуру с высокой точностью. Использование различных ДОЭ позволяет гибко менять форму пучков при сохранении структурной устойчивости и обеспечить выделение размеров и дефектов поверхности с заранее заданными характеристиками (микроструктуру поверхности).

Таким образом, данный метод основан на зондировании исследуемого объекта ТСИ, регистрации рассеянного на физической фигуре излучения с помощью цифрового фотоаппарата и компьютерной обработке полученных изображений. Формирование ТСИ позволяет сохранить его высокую когерентность и обеспечить малую расходимость пучков. Это дает возможность использовать для описания ТСИ представления геометрической оптики.

3. Экспериментальная установка

Схема созданной установки для количественной визуализации параметров исследуемых физических фигур показана на рис. 1. Излучение от оптического модуля 1, состоящего из источника когерентного излучения и блок питания лазера 2 и ДОЭ 3, проходит через объектив 4 и освещает экран 5 с закрепленной на нем исследуемой

геометрической фигурой 6. Изображение регистрируется с помощью цифрового фотоаппарата 7 и отображается на экране персонального компьютера 8.

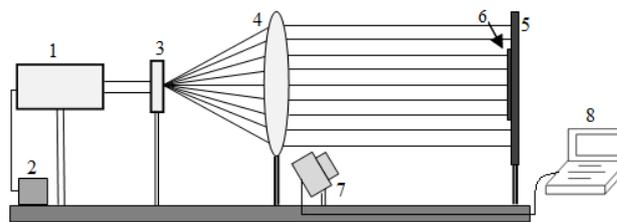


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – источник оптического когерентного излучения, 2 – блок питания лазера, 3 – дифракционный оптический элемент (ДОЭ), 4 – объектив, 5 – экран, 6 – геометрическая фигура, 7 – цифровой фотоаппарат, 8 – персональный компьютер.

Источником оптического излучения создает узкий поляризованный пучок, который направляется на ДОЭ. При юстировке он вращается вокруг оптической оси для получения максимальной резкости дифракционной картины. После ДОЭ получается много дифрагированных узких пучков, которые направляются на коллимирующий объектив 3, создающий матрицу параллельных пучков, распространяющихся вдоль оптической оси. На экране 4 получается изображение дифракционной картины, которое регистрируется с помощью цифрового фотоаппарата 6.

На экране размещаются исследуемые физические фигуры, параметры которых необходимо определить. На рис. 2 и 3 показаны изображения двух различных исследуемых физических фигур: треугольника и параллелограмма при различных углах их поворота. Центр изучаемых фигур совпадает с центром экрана.

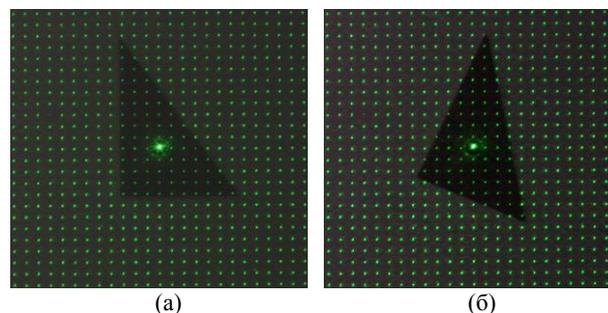


Рис. 2. Изображения треугольной фигуры: (а) исходное, (б) повернутое.

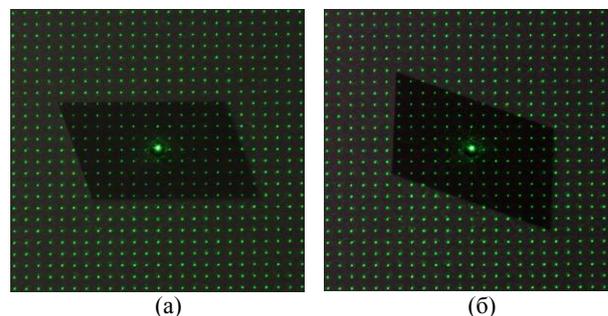


Рис. 3. Изображение параллелограммной фигуры: (а) исходное, (б) повернутое.

4. Алгоритм цифровой обработки физических фигур

Основной целью разработки алгоритма является возможность определения с его помощью геометрических

параметров исследуемых фигур. Особенностью алгоритма является использование ТСИ, присутствующего на экспериментальных изображениях, для определения масштабных коэффициентов. Такой подход позволяет проводить бесконтактные измерения геометрических параметров плоских фигур без предварительного проведения процедуры калибровки цифровой видеокамеры.

Точечное структурированное излучение на изображениях представляет собой периодическую структуру, состоящую из эквидистантно расположенных пятен (точек) лазерного излучения. Расстояния между пятнами позволяет оценить вертикальный и горизонтальный масштабный коэффициент. Также при необходимости можно провести калибровку видеокамеры [8] по известным расположениям точек структурированного излучения, в том числе для компенсации оптических aberrаций и уменьшения погрешности измерения.

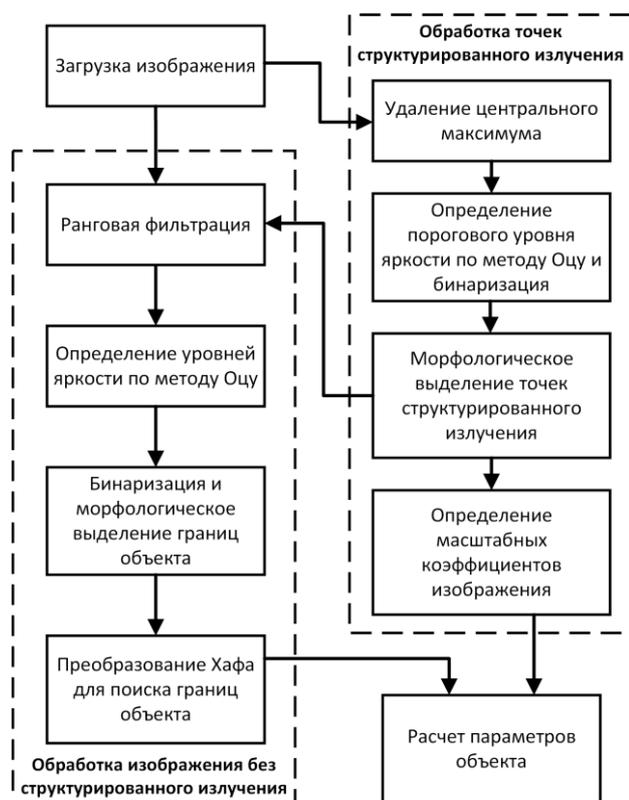


Рис. 4. Алгоритм цифровой обработки изображений для определения геометрических параметров объектов.

Предлагаемый алгоритм определения геометрических параметров плоских фигур представлен на рис. 4. Из рисунка видно, что он разделен на две части: обработка пятен или точек ТСИ на изображении и обработка дифракционных картин без точек ТСИ. Информация, полученная в первой части, используется во второй для определения размера маски, для ранговой фильтрации и в итоговом расчете параметров фигур в виде масштабных коэффициентов изображения.

Рассмотрим детально все шаги данного алгоритма. После загрузки изображения происходит удаление с него центрального максимума, который является паразитным элементом и мешает дальнейшей обработке. Удаление происходит по признаку наиболее яркого и большого по площади объекта на изображении. Далее для выделения оставшихся пятен структурированного излучения

используется бинаризация изображения (пороговая фильтрация). Для проведения бинаризации автоматически определяется оптимальный уровень порога по методу Оцу [9].

Для выделения точек используется морфологическое выделение замкнутых отдельно стоящих фигур [10]. Оценка параметров выделенных фигур позволяет определить средний размер точек. Этот размер в дальнейшем используется в ранговой фильтрации. По расположению выделенных объектов также рассчитываются масштабные коэффициенты изображения, которые в последствии учитываются при расчете геометрических параметров объектов. На этом использование точек структурированного излучения на изображении заканчивается.

В следующей части алгоритма точки становятся нежелательными объектами, которые необходимо удалить. Для этого применяется ранговая фильтрация. Размер фильтра выбирается исходя из среднего размера точек, полученного в предыдущих действиях. Для приведенного далее примера размер маски составил 15×15 пикселей при размере точек порядка 10-12 пикселей, для фильтрации выбирался 20-й по порядку элемент. Ранговая фильтрация позволяет качественно удалить точки с изображения, оставив только исследуемую фигуру и фон.

Далее происходит расчет нескольких уровней яркости по методу Оцу для выделения исследуемой фигуры. Более одного уровня требуется из-за неравномерного освещения заднего фона изображения. Выделение области, лежащей в центре изображения, и бинаризация ее по уровням яркости позволяет надежно отделить искомую фигуру от фона.

На следующем шаге алгоритма морфологические операции закрытия и выделения границ используются для точного выделения, как самой фигуры, так и ее границ. Выделенная граница подвергается преобразованию Хафа для поиска прямых [11], описывающих периметр фигуры. Для определения количества локальных максимумов в преобразовании используется априорная информация об исследуемой фигуре (количество сторон многоугольника).

На конечном этапе алгоритма происходит расчет геометрических параметров плоской фигуры: площади, периметра, положение центра, ориентация (по главной оси описывающего объект эллипса), и др. При расчете используются масштабные коэффициенты изображения, полученные на предыдущих шагах при обработке изображения. Пример результата обработки дифракционной картины с плоским многоугольником с помощью разработанного алгоритма приведены на рис.5- б.

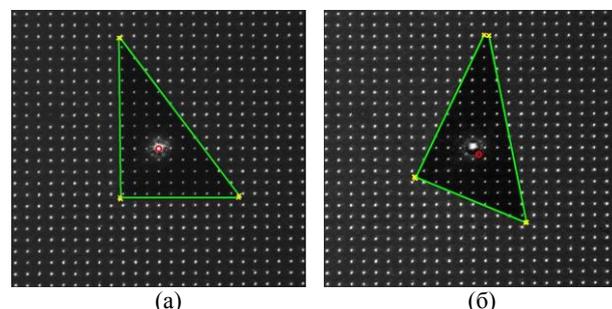


Рис. 5. Результаты обработки изображения треугольной фигуры на основе разработанного алгоритма: площадь 17755 мм^2 , периметр 1896 мм, ориентация $-62,0^\circ$, (а) исходное, (б) повернутое.

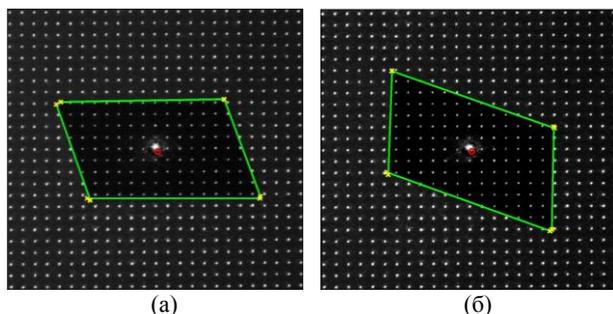


Рис. 6. Результаты обработки изображения фигуры в виде параллелограмма: площадь 19237 мм², периметр 2063 мм, ориентация -12,6°, (а) исходное, (б) повернутое.

5. Заключение

Разработан бесконтактный метод визуализации проекции диффузно рассеивающего физического тела и определения его геометрических параметров на основе сопоставления изображения проекции с матрицей точек, расположенных на фиксированном расстоянии друг от друга. Сопоставление происходит на физическом уровне, что позволяет избежать возможных погрешностей, связанных с искажением объекта при фотографировании, т.е. предлагаемый метод не требует калибровки. В данном случае, матрица точек, создаваемая ДОЭ, играет роль «измерительной линейки», поэтому погрешность прямых измерений геометрических параметров определяется погрешностью расстояния между точками и для данной установки составляет 1мм.

Для реализации метода создана экспериментальная установка, содержащая источник когерентного оптического излучения, дифракционный элемент для получения ТСИ, экран, цифровую фотокамеру. Приведены результаты экспериментов по измерению параметров ряда исследуемых физических фигур при помощи ТСИ.

Дополнительное преимущество данного метода измерения геометрических параметров физических тел перед другими оптическими методами обусловлено дискретным характером регистрируемых изображений, что даёт возможность применять хорошо разработанные цифровые методы обработки информации [6].

Данный метод бесконтактного определения геометрических параметров физических тел на основе использования точно структурированного излучения может найти широкое применение в различных областях современной техники, в частности, при создании автоматизированной системы бесконтактной классификации объектов по заданным параметрам и при восстановлении формы и размеров тела по его проекциям.

6. Литература

- [1] Блейкер А. Применение фотографии в науке. М.: Мир, 1980. – 248 с.
- [2] Сойфер В.А., Безус Е.А., Быков Д.А., Досколович Л.Л., Ковалев А.А. и др. Дифракционная оптика и нанофотоника. М.: Физматлит, 2014. – 608 с.
- [3] Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спеклинтерферометрия. Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 328 с.
- [4] Вин А.М., Павлов И.Н., Ринкевичюс Б.С. Визуализация геометрических параметров диффузно рассеивающих плоских тел с помощью структурированного оптического излучения: Научная визуализация, 2017, Том 9, № 2. с. 43 – 48.
- [5] Вин А.М., Павлов И.Н., Ринкевичюс Б.С. Оптико-электронный комплекс для визуализации формы шероховатой поверхности с помощью структурированного

оптического излучения: Труды XIV Международной научно-технической конференции. [Электронный ресурс] – М. Издательство Перо, 2017. с. 389 – 393.

[6] Rinkevichyus B.S., Evtikhieva O.A., Raskovskaya I.L. Laser Refractography. New York, Springer, 2011. – 189 p.

[7] Методы компьютерной обработки изображений/ Под ред. В.А.Сойфера - М.: Физматлит. 2001.-784 с.-ISBN 5-9221-0180-3.

[8] Salvi J., Armangué X., Batlle J. A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation // Pattern recognition. – 2002. – Vol. 35. – №. 7. – Pp. 1617-1635.

[9] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. –1979. –Vol. 9. –№. 1. – Pp. 62-66.

[10] Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2012. 1104 с.

[11] Шапиро Л., Стокман Д. Компьютерное зрение. БИНОМ. Лаб. знаний, 2006. 752 с.

Об авторах

Аунг Мью Вин, аспирант кафедры физики им. В.А. Фабриканта Национального исследовательского университета «МЭИ», hamburger49@gmail.com.

Ринкевичюс Бронюс Симович, д.ф.-м.н., профессор кафедры физики им. В.А. Фабриканта Национального исследовательского университета «МЭИ», rinkevbs@mail.ru.

Поройков Антон Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры физики им. В.А. Фабриканта Национального исследовательского университета «МЭИ», poroykovay@gmail.com.