

УДК 535.32/58+543.4

ИЗМЕРЕНИЕ ГРАДИЕНТОВ ОПТИЧЕСКОЙ ДЛИНЫ С ПОМОЩЬЮ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ФОТОГРАФИЙ СЛУЧАЙНЫХ КАРТИН

В. Н. Боркова, А. В. Крайский, Т. В. Миронова, Т. Т. Султанов

В работе предложен метод измерения градиента показателя преломления оптически прозрачной среды с использованием случайного бинарного изображения как аналога спекл-структуры. По способу обработки данных метод аналогичен обычной спекл-фотографии в цифровом варианте, но вместо определения сдвижек по ширине и направлению полос используется корреляционная обработка двух фотографий. Получаемая при этом точность не уступает точности спекл-фотографических методов.

Спекл-интерферометрия [1] позволяет исследовать смещения, деформации, вибрации объектов с оптически грубой поверхностью, а также определять оптическую плотность прозрачных сред. Носителем информации при этом выступают спекл-модулированные волны. Смещение или деформация поверхности влечет за собой соответствующее пространственное перемещение спекл-структур, измерение которого позволяет определить смещение самой поверхности. Для этого делают двойную экспозицию – регистрируются спекл-картины начального и измененного состояний объекта, а затем в поле дифракции лазерного пучка изучается спектр пространственных частот записанной двойной спекл-структуры.

Ранее авторами был предложен метод, аналогичный классической спекл-фотографии, но без использования лазерного излучения [2 – 3]. Аналогом спекл-картин выступали изображения случайных двумерных последовательностей черных и белых точек, напечатанных на бумаге. Этот случайный узор регистрировался цифровым фотоаппаратом для начального и измененного состояний объекта (поверхности или среды, сквозь которую производилась съемка). Затем две полученные фотографии обрабатывались по аналогии с классическим методом спекл-фотографии. В результате получалась система “интерференционных” полос, по ширине и направлению которых определялись величина и линия направления сдвига объекта. При различных в разных частях поля зрения

сдвигах приходилось вырезать участки снимков с приблизительно постоянным сдвигом и обрабатывать их отдельно.

В настоящей работе предлагается другой, корреляционный, способ обработки таких двух фотографий. Сдвиг изображения определяется для окрестности каждой точки исходной цифровой фотографии. Вместо сложения двух картин и изучения спектра полученной суммы исследуется взаимная корреляция интенсивностей I_0 и I_1 небольших участков этих фотографий:

$$K_{\text{вз}}(\vec{\tau}) = \int_S d\vec{r} I_0(\vec{r}) I_1(\vec{r} + \vec{\tau}),$$

где S – область, по которой проводится обработка. В случае простого смещения или выбора на картине окна такого размера, что в его пределах изображение перемещается как целое, без деформации, функция взаимной корреляции принимает вид:

$$K_{\text{вз}}(\vec{\tau}) = \int_S d\vec{r} I_0(\vec{r}) I_0(\vec{r} + \vec{\tau} - \vec{\tau}_0),$$

где $\vec{\tau}_0$ – вектор смещения для всего изображения, или вектор локального смещения в случае ограниченной области. Нетрудно видеть, что $K_{\text{вз}}(\vec{\tau})$ – это, в сущности, функция автокорреляции неискаженного изображения, смещенная на $\vec{\tau}_0$. По положению максимума функции $K_{\text{вз}}(\vec{\tau})$ мы определяем локальное значение $\vec{\tau}_0$ для этого участка, которое мы приписываем точке, соответствующей центру окна. Выполняя в каждой точке описанную процедуру, мы строим поле смещений, которое пропорционально градиенту показателя преломления. Следует обратить внимание на то, что здесь мы получаем не величину смещения и линию направления смещения, а вектор смещения.

После обработки двух таких снимков мы получаем величину сдвига для возмущенного изображения в каждой точке (пикселе). При этом для получения хорошей точности требуется вычисление смещения с точностью, существенно меньшей пикселя в фотографическом изображении, что вполне реально, но требует адекватной аппроксимации функции взаимной корреляции и малого уровня шумов.

Схема фотографирования достаточно очевидна. Случайная картина изображена на плоском экране, расположенном перпендикулярно оптической оси фотоаппарата, удаленного в нашем случае на расстояние 1 м от экрана. Между экраном и фотоаппаратом располагается прозрачный исследуемый объект (у нас пламя спиртовки). Расстояние от спиртовки до экрана составляло 5, 50 и 85 см. Размер матрицы фотоаппарата составлял 5 Мпкс. Обработывалась, как правило, часть изображения. Размер картины на

экране по вертикальной оси составлял от 10 до 29 см, по горизонтальной оси обрабатываемый размер составлял около 5 см (больше максимального диаметра пламени). В качестве объекта использовался черно-белый узор на регулярной сетке с квадратными ячейками со случайным распределением зачернения ячеек с бинарной (большая часть экспериментов) или гауссовой статистикой. Площадь изображения ячейки содержала 7–10 пикселей матрицы фотоаппарата.

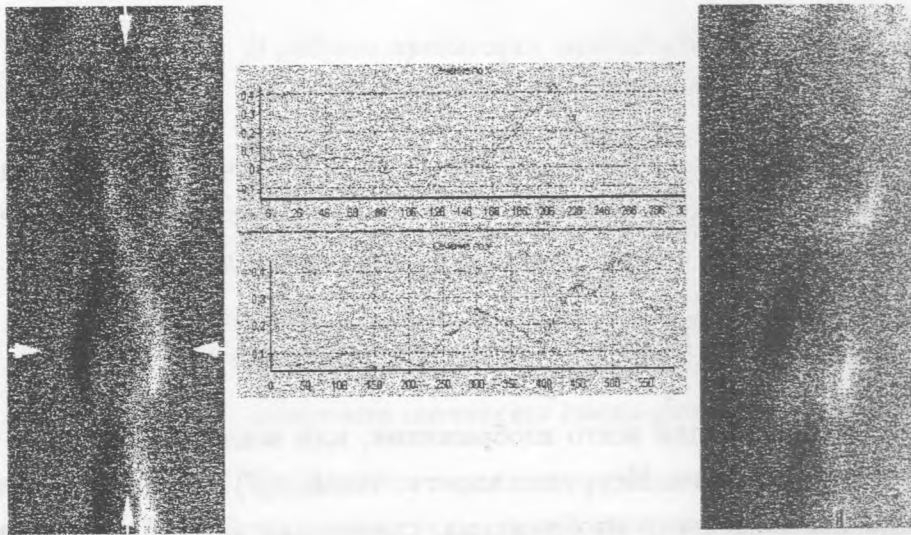


Рис. 1. Общий вид распределения сдвигов по оси абсцисс (слева) и по оси ординат (справа) для двух фотографий и характерный вид горизонтального и вертикального сечений левого распределения. Светлые области соответствуют положительным сдвигам, темные – отрицательным. По обеим осям графиков – пиксели матрицы фотоаппарата.

Результат обработки одной из пар фотографий приведен на рис. 1. Слева – картина распределения горизонтальной составляющей смещения. Серый фон соответствует нулевому значению компоненты. Темные области соответствуют сдвигу в отрицательном направлении оси абсцисс, светлые – в положительном. Более темные в первом случае или более светлые во втором случае области соответствуют большим значениям сдвига. В нижней четверти картины четко видно пламя спиртовки, а выше – вихревые образования. В центре приведены горизонтальные и вертикальные сечения левой картины, положения которых отмечены стрелками. Справа – распределение вертикальной составляющей сдвига. Видны области пламени и вихревых структур с тем же внешним контуром, но другим характером заполнения. По верхнему графику можно оценить, что точность определения сдвига составляет существенно менее 0.1 пикселя фотоаппарата. По нижнему графику видно, что по мере опускания к пламени и вхождения в область

пламени, величина градиента оптической толщины в среднем возрастает. Следует отметить, что апертура объектива имеет диаметр около 35 мм. В рассмотренном выше примере апертура пучка, образующего изображение одного пикселя фотоаппарата, на исследуемом объекте (пламени) составляет около 1.7 мм, так что полученная картина распределения достаточно локальна. Однако вследствие близости объекта к экрану со случайной картиной (5 см) при заданном значении минимально измеримого смещения картины (0.1 пикселя) величина соответствующего угла отклонения $\varphi = d(nl)/dx$ составляет $3.7 \cdot 10^{-5}$. По мере удаления объекта от экрана до 85 см эта величина уменьшается до $2.1 \cdot 10^{-6}$. При этом апертура пучка на объекте для одного пикселя возрастает до 27 мм, и величина градиента становится нелокальной характеристикой.

Следует отметить, что в [4] практически по той же схеме проведены измерения модельного объекта (клин) и сделан вывод, что смещение деталей изображения может быть вычислено с погрешностью в 1 пиксель и наименьшее регистрируемое изменение показателя преломления составляет 0.01. На наш взгляд это является значительно заниженной оценкой возможностей метода.

Т.о. корреляционная обработка цифровых фотографий случайных изображений позволяет получить распределение градиента оптической длины по исследуемому объекту с хорошей точностью. Точность смещения области изображения получается лучше, чем 0.1 пикселя. При этом оценка минимально измеримого градиента показателя преломления в приближении плоского пламени составляет около $1 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Клименко И. С. Голография сфокусированных изображений и спеклинтерферометрия. М., Наука, Гл.ред.физ.-мат.лит., 1985.
- [2] Мironova T. V., Sultanov T. T., Zubov V. A. Journal of Russian Laser Research, **25**, N 6, 493 (2004).
- [3] Боркова В. Н., Жуков А. И., Zubov В. А., Мironova Т. В., Султанов Т. Т. Труды VIII Международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков". Москва 28 июня – 1 июля 2005 года. Изд-во МЭИ, с. 256.
- [4] Попова Е. М., Телкачев А. В., Пешков Д. И. Труды VIII Международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков". Москва 28 июня – 1 июля 2005 года. Изд-во МЭИ, с. 120.

Поступила в редакцию 11 июля 2006 г.