

На правах рукописи
УДК 535.015

Миронова Татьяна Вячеславовна

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИЙ, ОПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ
И ДИСТОРСИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ
СПЕКЛОВ В ЦИФРОВОЙ ФОТОГРАФИИ

01.04.05 – Оптика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физический институт имени П.Н.Лебедева Российской академии наук.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук Крайский Александр Владиславович,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Ринкевичюс Бронюс Симович,
Национальный исследовательский университет Московский энергетический институт, г. Москва

кандидат физико-математических наук Путилин Андрей Николаевич, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук

Защита состоится 18 февраля 2013 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д002.023.03 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д002.023.03

Шиканов А.С.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В традиционных методах регистрации изображений цифровые матрицы практически вытеснили фотопленки. Матрицы, по сравнению с фотопленкой, обладают рядом преимуществ:

- практически мгновенное (по сравнению с процедурой обработки фотопленки) преобразование интенсивности в цифровые данные;
- высокие показатели фотографической широты (до 14 ступеней экспозиции у современных матриц), с возможностью увеличения ее специальными методами;
- жесткая система координат на изображении в виде номеров пикселей;
- хорошая согласованность потока данных об изображении с техникой хранения и обработки данных на современных компьютерах.

Эти преимущества особенно существенны для оптических измерений. С увеличением производительности компьютеров и развитием компьютерных вычислительных методов цифровая обработка изображений резко шагнула вперед и широко применяется в различных областях исследований, практически вытеснив чисто оптические, аналоговые методы. Среди методов обработки цифровых изображений особое место занимает корреляционная обработка. На ее основе базируются как системы распознавания изображений, так и некоторые методы измерения деформаций, а также скорости и показателя преломления в потоках жидкостей и газов.

Важной особенностью цифровых изображений является фиксированный размер пикселей и пространственный период их расположения, задающий пространственную дискретизацию данных. На первый взгляд может показаться, что период расположения пикселей определяет пространственное разрешение фоторегистратора. Но в действительности точность измерения положения объекта на изображении можно значительно улучшить за счет того, что аппаратная функция оптической системы, отображающей объект на матрицу, отлична от дельта-функции и превосходит по размеру приемный элемент матрицы. Соответствующая аппроксимация формы аппаратной функции оптической системы (либо формы корреляционного пика) позволяет определять координаты объекта с точностью почти на два порядка лучшей, чем расстояние между элементами регистрирующей матрицы. Это дает возможность при исследовании цифровых изображений обнаруживать такие сдвиги и искажения, масштаб которых мень-

ше расстояния между приемными элементами матрицы.

Цель работы и задачи исследования

Целью работы являлась разработка способов измерения поля локальных сдвигов изображения с помощью искусственных спекл-картин для измерения:

- градиентов показателя преломления в прозрачных средах распространения излучения,
- деформаций поверхности объектов
- геометрических искажений, вносимых в изображение оптическими системами.

Целью работы также было исследование корреляционных характеристик изображений в зависимости от их свойств, а также корреляционных характеристик, получаемых в интерференционном корреляторе для бинарных случайных транспарантов.

Научная новизна

Для решения ряда задач, связанных с обнаружением малых локальных сдвигов в изображениях и измерением малых оптических неоднородностей, в нашей работе применен метод цифровой регистрации искусственных спеклов. Применение искусственных спеклов для обнаружения малых искажений изображения в исследованиях деформаций, оптических неоднородностей прозрачных сред и дисторсионных характеристик объективов является новым в практике оптических измерений. Преимущество искусственных спекл-картин заключается в следующем:

- Данные об изображении известны до проведения экспериментов и могут использоваться в качестве эталона для последующего сравнения с реальным изображением (иногда это позволяет исключить процедуру двух экспозиций).

- В отличие от регулярных тестовых изображений (сеток, реперных меток и т.д.) спекл-картина присутствует во всех областях изображения, и поэтому можно оценивать искажения в произвольной точке изображения без процедуры интерполяции.

- В зависимости от задачи можно выбирать масштаб неоднородностей искусственной спекл-картины.

- Не требуется лазер, что для применения разработанных методов вне научной лаборатории облегчает измерения.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Реализация схемы измерений деформаций и оптических неоднородностей в белом свете с помощью искусственных спеклов, подобной схеме классической спекл-фотографии. Схема пригодна для измерения смещений поверхности объекта в широком диапазоне величин смещения, до 100 мм, с точностью измерений ~ 0.3 мм. При измерениях градиента оптической длины точность порядка 5×10^{-4} на пути от объекта до фотоаппарата.

2. Реализация схемы корреляционных измерений с искусственными спеклами в качестве фонового изображения для исследования оптических неоднородностей в газовом потоке. Минимально измеримый угол отклонения луча 2.5×10^{-6} рад.

3. Схема корреляционных измерений градиентов оптической длины с помощью искусственных спекл-картин реализована для исследований механических и термических нагрузок твердых тел из прозрачных материалов. Показано, что при поперечных нагрузках балки сечение поля смещений фоновой структуры соответствует эпюрам напряжений. Корреляционные исследования дают дополнительную информацию о деформациях объектов по сравнению с поляризационными методами.

4. Разработан новый метод измерения дисторсии и хроматических искажений оптических систем на основе корреляционной обработки изображений искусственных спеклов. Точность измерения дисторсионных искажений порядка 0.01%, точность измерения хроматических искажений не хуже 0.001%. Метод обладает тем преимуществом, что тестовая съемка выполняется предельно простым способом, без использования прецизионных измерительных систем и стендов, «с руки». Не делается никаких априорных предположений о свойствах функции дисторсии. В результате получается не полиномиальное приближение формы кривой дисторсии, а напрямую измеряется искажение в любой точке кадра.

5. Исследована зависимость субпиксельной точности корреляционных измерений от свойств изображений, используемых для измерений, а также от параметров корреляционного алгоритма. Благодаря оптимальному выбору используемых параметров получена точность корреляционных измерений взаимного сдвига двух цифровых изображений до 0.01 пикселя приемной матрицы.

Практическая ценность

Разработан удобный в применении способ измерения дисторсии и хрома-

тической аберрации оптических систем. На основе исследования зависимости точности корреляционных измерений от различных параметров проведена оптимизация корреляционного алгоритма и определены рекомендуемые параметры изображений, используемых в корреляционных измерениях. Создан пакет программ с удобным интерфейсом для корреляционных измерений деформаций, градиентов оптической длины, а также дисторсионных и хроматических искажений объективов. За счет корреляционного совмещения двух изображений перед началом измерений можно использовать изображения, отличающиеся по ракурсу и масштабу, что допускает некоторую свободу при сборке и фиксации оптической схемы регистрации. Показано, что обычный цифровой фотоаппарат может быть использован как точный измерительный прибор.

Личный вклад

Автор принимал непосредственное участие в разработке методик и экспериментах по измерениям корреляционных функций оптико-электронным методом и цифровой спекл-фотографии. В разделах, касающихся корреляционных измерений и калибровки оптических систем, все расчеты, измерения и обработка результатов, включая разработку алгоритмов и программного обеспечения, выполнены автором лично.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 6-ти конференциях в виде 10-ти устных докладов:

6 Всесоюзная школа-семинар по оптической обработке информации, Фрунзе, 1986.

VIII международная научно-техническая конференция "Оптические методы исследования потоков", Москва, 2005 год.

IX международная научно-техническая конференция "Оптические методы исследования потоков". Москва, 2007 год.

X юбилейная международная научно-техническая конференция "Оптические методы исследования потоков", Москва, 2009 год.

XI международная научно-техническая конференция "Оптические методы исследования потоков". Москва, 2011 год.

Научно-техническая конференция – семинар по фотонике и информационной оптике, Москва, МИФИ, 2011 г.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 19 работах, из них 6 статей в реферируемых журналах, входящих в список ВАК, 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Она изложена на 95 страницах машинописного текста, включает 48 рисунков и содержит список литературы из 100 наименований, среди которых 40 отечественных и 60 иностранных авторов.

Содержание диссертации

Во **введении** сформулированы актуальность и практическая значимость работы, а также ее цели и задачи. Приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** дан краткий обзор оптических методов измерений, связанных с тематикой работы, таких как голографическая интерферометрия, спекл-интерферометрия и спекл-фотография. Отмечены преимущества и трудности цифровой регистрации и обработки спекл-изображений, а также логическая связь спекл-фотографии и цифровой корреляции изображений. Дан краткий обзор работ, посвященных применению корреляционных методов для исследования деформаций и потоков жидкостей и газов, работ, затрагивающих точность корреляционных измерений, а также исследований, касающихся определения дисторсии оптических систем и измерительных возможностей цифровых фотоаппаратов.

Во **второй главе** приводится описание метода и экспериментальных результатов измерений с помощью искусственных спекл-картин в белом свете, с обработкой зарегистрированных изображений по схеме спекл-фотографии. Рассмотрены схемы измерения сдвига и поворота поверхности объекта при деформации, а также измерения величины оптических неоднородностей на модельных объектах. Как в случае анализа деформаций, так и при измерениях оптических неоднородностей, анализируется изменение изображения специальным образом сформированной бинарной картины, подобной спекл-структуре. Различие состоит в том, что при анализе деформаций искусственная спекл-картина жестко связана с исследуемым объектом, и измерения проводятся при различных взаимных смещениях камеры и поверхности объекта, а при исследовании

оптических неоднородностей изображение стационарной спекл-картины претерпевает искажения при прохождении излучения, формирующего ее изображение, через исследуемую среду. Регистрируется два изображения, одно соответствует исходному состоянию объекта, второе - его измененному состоянию. Изменение состояния объекта приводит к смещению случайной структуры в плоскости регистрации. Анализ полученной информации заключается в образовании двоянной картины, выполнении преобразования Фурье и формировании спектра пространственных частот. Период получаемой при этом картины однозначно связан с величиной смещения случайной структуры в плоскости регистрации и структурой неоднородностей. Поперечные смещения поверхности измеряются в широком диапазоне (до 100 мм), точность измерений ~ 0.3 мм. При измерениях градиента оптического пути точность порядка 5×10^{-4} .

Изменение порядка операций при обработке искусственных спекл-картин приводит к использованию корреляционного метода. Он требует несколько больших вычислительных ресурсов, но более удобен для оператора.

В **третьей главе** изложены работы по вариантам реализации корреляционного метода, а также приведены исследования точности корреляционных измерений. В разделе 3.2 приводится оценка статистической погрешности измерения сдвига в модели бинарных изображений, а также исследование зависимости систематической и статистической ошибок от свойств обрабатываемых изображений. Рассматривается влияние дискретности изображения на точность получения субпиксельного значения положения корреляционного пика, проводится оценка величины статистического разброса измерений.

Рассмотрена модель бинарных изображений, и показано, что статистическая ошибка зависит от числа информационных элементов в рабочем окне как $\delta x \sim N^{-0,75}$ и растет пропорционально квадратному корню измеряемого смещения: $\delta x \sim \sqrt{\Delta x}$. Величина превышения корреляционного сигнала над фоном зависит от числа элементов линейно. Зависимость этой величины от вероятности заполнения изображения черными элементами при больших значениях N имеет максимум при $p = 0.5$.

Исследована точность субпиксельного расчета смещения при корреляционных измерениях в зависимости от свойств используемых изображений и приведены рекомендации для выбора параметров изображений и корреляционного алгоритма.

Вероятность заполнения изображения светлыми элементами должна быть

0,5, так как зависимость отношения сигнал – шум имеет максимум при $p = 0.5$.

Рекомендуется аппроксимация формы корреляционного пика конусом.

При сравнении двух изображений с разной резкостью (например, эталонного изображения и фотографии) степень размытия более резкого изображения можно увеличить для уменьшения статистических ошибок измерения.

Систематическая ошибка должна оцениваться для конкретных параметров пары изображений (средний размер элементов, радиус размытия) и затем учитываться при измерениях поля взаимных сдвигов этих изображений.

При измерении больших сдвигов к увеличению точности приводит ступенчатая процедура: определение и компенсация крупномасштабных изменений на первом этапе обработки, и затем, на втором этапе, определение более тонкой структуры поля сдвигов изображений.

Размер окна корреляции следует выбирать минимальным, исходя из геометрии задачи и априорных сведений о структуре поля сдвигов изображений. Увеличение окна улучшает статистические характеристики измерений, но может привести к потере локальности измерений.

В разделах 3.3 и 3.4 рассмотрены примеры применения корреляционного метода для измерения неоднородностей показателя преломления в прозрачных средах. В разделе 3.3 приведены результаты измерений градиентов оптической длины в пламени. Оценка минимально измеримого градиента показателя преломления в приближении плоского пламени составляет около $1 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}$.

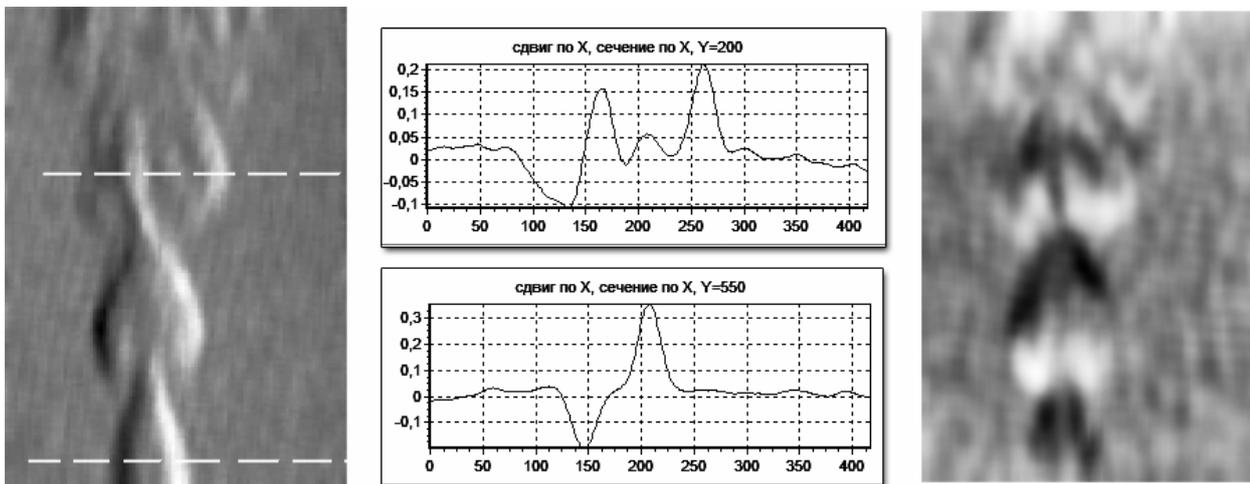


Рис.1. Общий вид распределения сдвигов по оси абсцисс (слева) и оси ординат (справа) для двух фотографий и характерные сечения горизонтальной составляющей. Светлые области соответствуют положительным сдвигам, темные – отрицательным. По обеим осям графиков – пиксели матрицы фотоаппарата.

Результат обработки одной из пар фотографий приведен на рис.1. Расстояние от объектива камеры до фоновой случайной картины 1 м. Объект (пламя спиртовки) был расположен в 5 см от экрана. При такой геометрии регистрации апертура пучка, образующего изображение одного пикселя приемной матрицы фотоаппарата, составляла около 1.7 мм, так что полученная картина распределения достаточно локальна. Максимальный сдвиг изображения фоновой структуры, к которому приводит отклонение лучей в пламени, в этом случае довольно мал, не больше 0,3 пикселя. При увеличении расстояния от объекта до фоновой картины измеряемый сдвиг растет (до 3 пикселей при расстоянии 80 см), но локальность теряется.

В параграфе 3.4 рассмотрена схема визуализации упругих напряжений в твердых прозрачных материалах, кварцевом стекле и оргстекле. Градиент оптического пути измерялся с помощью корреляционного метода. Картина со случайной структурой регистрировалась сквозь исследуемый прозрачный объект. Модельные эксперименты проводились при различных конфигурациях поперечной статической нагрузки балки из оргстекла и для процесса точечного нагрева кварцевого стекла. Было показано, что сечение поля смещений фоновой структуры соответствует эпюрам напряжений при данной схеме нагрузки балки. В отличие от метода, основанного на эффекте фотоупругости, корреляционный метод дает информацию о параметрах исследуемого образца, приводящих к изменению оптического пути. Нужно также отметить, что корреляционный метод дает информацию

о различиях между двумя состояниями объекта, что сразу исключает влияние остаточных напряжений, а также других добавочных деформаций (например, напряжений, возникающих при креплении исследуемой детали).

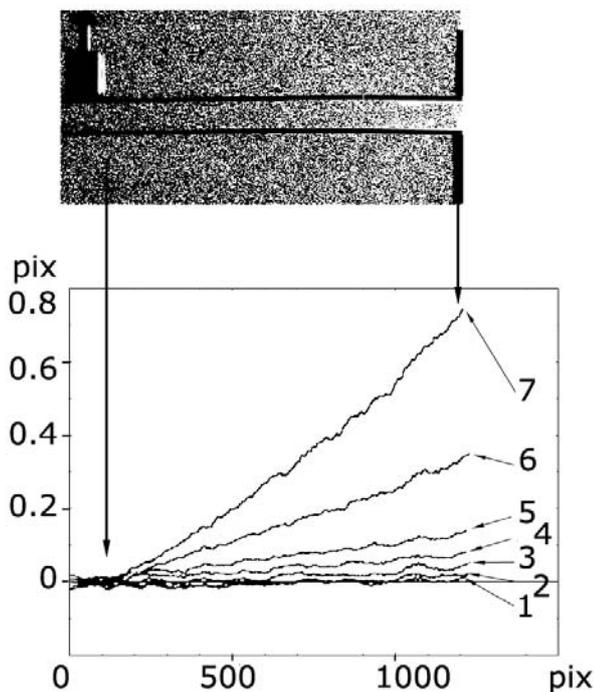


Рис.2. Дозированная нагрузка балки. Горизонтальная ось – координаты вдоль балки в пикселях, вертикальная ось – вертикальное смещение структуры фона. Кривые 1 – 7 соответствуют различным нагрузкам: 1 – 1 г, 2 – 2 г, 3 – 5 г, 4 – 10 г, 5 – 20 г, 6 – 50 г, 7 – 100 г.

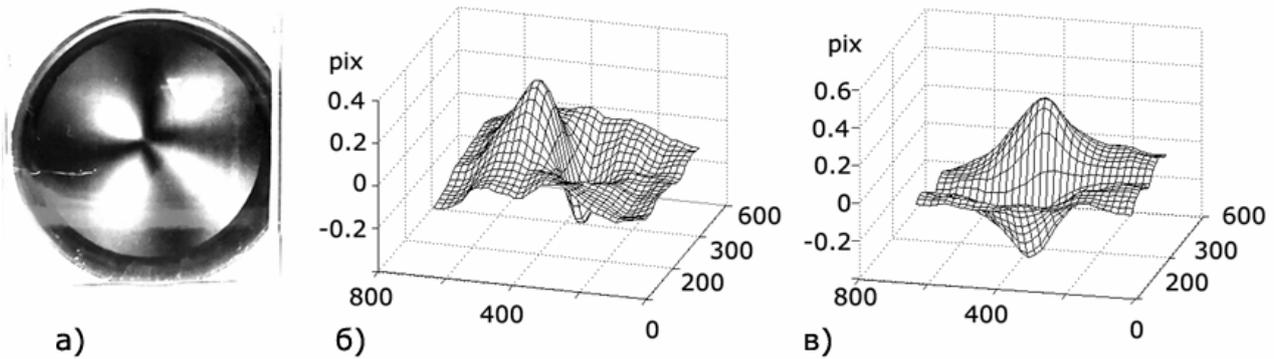


Рис. 3. а – стекло в скрещенных поляроидах после точечного нагрева в центральной точке, б – горизонтальная компонента сдвига, в – вертикальная компонента сдвига.

В четвертой главе рассмотрено применение корреляционной обработки изображений для определения дисторсионных и хроматических искажений фотографических камер и объективов. При этом в качестве исследуемой прозрачной среды, вносящей неоднородности в изображение, берется сама оптическая система, строящая это изображение.

Измерения проводятся следующим образом. Делается снимок известного случайного плоского бинарного калибровочного объекта. Снимок можно делать без закрепления фотоаппарата, «с руки». Корреляционным методом находят четыре пары точек соответствия на снимке и на калибровочном объекте, что дает восемь необходимых коэффициентов для исключения проективных искажений (наклон оптической оси, масштаб, поворот, сдвиг). После этого путем корреляционной обработки вычисляется величина и ориентация смещения любой малой области снимка относительно соответствующей области калибровочного объекта. При обработке скользящим окном получают значения смещений в каждой точке снимка. Эта матрица затем может быть использована для компенсации искажений снимков, полученных с помощью данной оптической системы.

С помощью похожей процедуры, путем корреляционной обработки пар областей изображения из разных цветовых каналов рассчитывается величина расхождения цветов, то есть оценивается степень хроматических искажений по площади кадра.

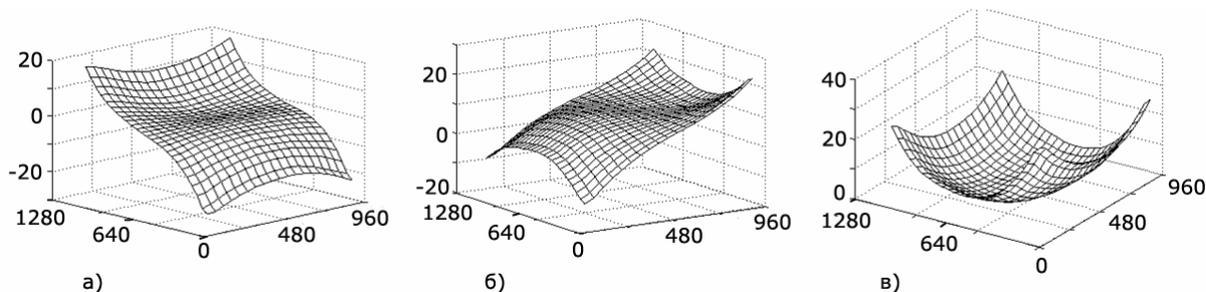


Рис.4. Типичный вид матрицы искажений. Данные рассчитаны для фотоаппарата Canon Power Shot A570 при размере кадра 1280x960 пикселей. Горизонтальные оси - координаты вдоль сторон кадра. Вертикальная ось – величина искажения в пикселях. а) – горизонтальная составляющая матрицы, б) – вертикальная составляющая, в) – абсолютные значения.

Для проверки возможностей метода исследован ряд цифровых фотоаппаратов различных производителей, а также сменные объективы.

На рис.5 показаны центральные горизонтальные сечения матриц смещений для некоторых марок цифровых фотоаппаратов (для минимального фокусного расстояния и стандартизированной ширины кадра 1280 пикселей). По оси абсцисс отложены номера пикселей приемной матрицы по центральной линии, от левого края кадра до правого, по оси ординат – величина горизонтальной составляющей матрицы смещений. Видно, что, хотя по порядку величины смещения в разных фотоаппаратах похожи, некоторые из моделей имеют свои особенности. Например, у фотоаппарата Lumix FZ18 кривая дисторсии имеет два перегиба вне области центра, а у фотоаппарата Olympus 1030SW искажения в правой и левой половинах кадра сильно отличаются из-за значительного смещения центра дисторсии относительно центра кадра.

На врезке показаны центральные горизонтальные сечения матриц смещений для фотоаппарата Sony F717 при различных фокусных расстояниях: кривая 1 соответствует минимальному фокусу - 9,7 мм, 2 – 11,1 мм, 3 – 12,7 мм, 4 – 14,9 мм, 5 – 18,8 мм. Кривая 6 отвечает максимальному оптическому увеличению, фокусное расстояние 48,5 мм. При изменении фокусного расстояния от минимального до 15 мм дисторсия падает до нуля, и при дальнейшем увеличении фокуса компоненты матрицы сдвига меняют знак.

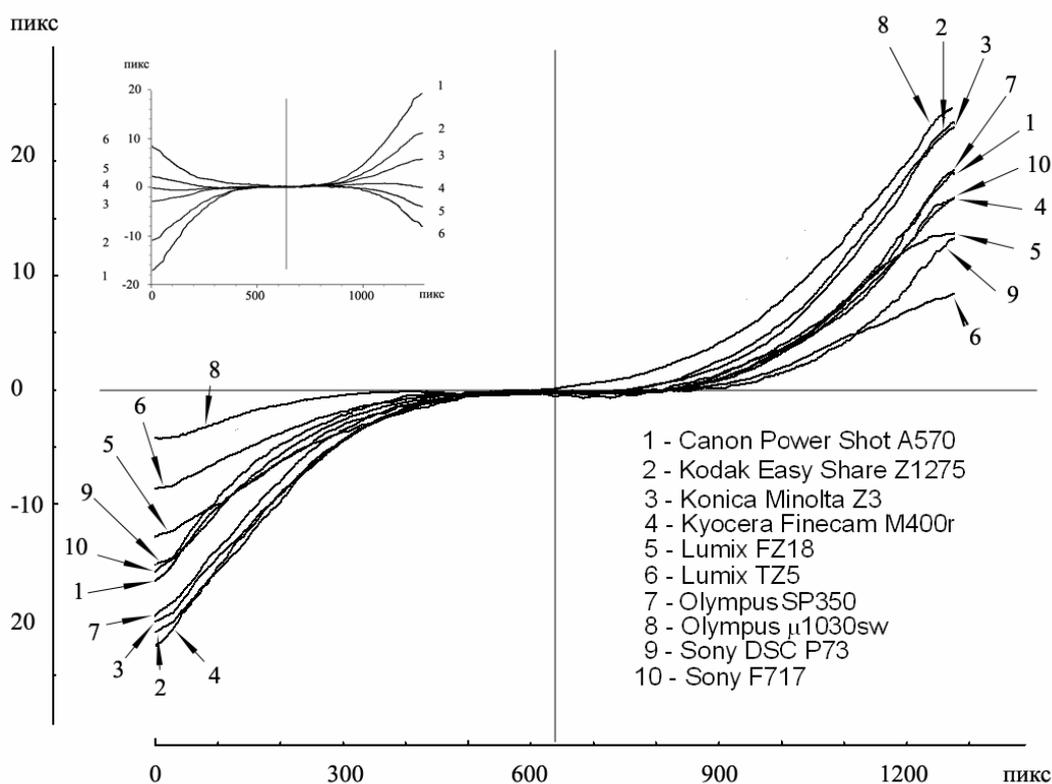


Рис.5. Центральные горизонтальные сечения матриц смещений (минимальное фокусное расстояние, ширина кадра 1280 пикселей). Ось x – координата вдоль кадра, ось y – величина горизонтальной составляющей матрицы смещений.

На врезке: центральные горизонтальные сечения матриц смещений для фотоаппарата Sony F717 при различных фокусных расстояниях: 1 - 9,7 мм, 2 – 11,1 мм, 3 – 12,7 мм, 4 – 14,9 мм, 5 – 18,8 мм, 6 - 48,5 мм.

У объективов с фиксированным фокусным расстоянием искажения очень малы (0,2% - 0,6%), кроме широкоугольного объектива Эра 6М (1,9%). У объективов с перестройкой фокуса и у фотоаппаратов со встроенными объективами искажения находятся в диапазоне 2% - 4,5% (кроме объектива Гранит 11м, у которого искажения крайне малы по сравнению с другими объективами с перестройкой фокуса – 0,6%).

В процессе получения матрицы дисторсионных искажений определяется центр дисторсии, а также значения радиальной и тангенциальной компонент дисторсионных искажений. У подавляющего большинства фотоаппаратов отклонение центра дисторсии от центра кадра не превышает 5 – 6 процентов от размера матрицы. Тангенциальная компонента дисторсии исчезающе мала практически у всех фотоаппаратов. Максимальное ее значение (порядка 0,15% при радиальной компоненте 2,3%) встретилось нам в фотоаппарате Sony F717.

Для объективов с переменным фокусом исследованы зависимости дисторсионных искажений от фокусного расстояния объектива. При увеличении фокусного расстояния искажения резко уменьшаются, и для большинства объективов дисторсия уменьшается до нуля, а затем из бочкообразной становится подушкообразной.

Чтобы использовать матрицу искажений для исправления снимков, полученных с помощью данной оптической системы, нужно сдвинуть точки изображения в соответствии с рассчитанными значениями искажения в данной точке. Для объективов с переменным фокусным расстоянием исправлять искажения снимков нужно с помощью матрицы, полученной при том же фокусном расстоянии, с которым сделан снимок.

При исправлении снимков с использованием корреляционного метода величина остаточных искажений снимка калибровочного объекта после исправления дисторсии находится в пределах одного пикселя (при использовании стандартных средств (Photoshop, ACDSee) – не меньше 5 пикселей).

Заключение.

В работе исследованы возможности использования искусственных спекл-картин как в оптико-электронных методах получения корреляционных функций, так и в методах, основанных на компьютерной обработке зарегистрированной оптической информации. Искусственные спеклы как объект с известным варьируемым амплитудным распределением использованы как для анализа и оптимизации параметров фоновых изображений и алгоритмов расчета, так и в реальных схемах измерения деформаций, градиентов оптической длины и дисторсионных искажений объективов.

Реализованы схемы измерения, подобные классическим схемам спекл-фотографии, но без использования когерентного излучения. Вместо лазерной спекл-структуры используется случайная бинарная картина, которая регистрируется дважды в соответствии с двумя состояниями объекта, как это делается в обычных системах спекл-фотографии. Для измерения деформаций такая искусственная спекл-структура жестко привязана к исследуемой поверхности объекта. При анализе оптических неоднородностей в прозрачных средах эта картина играет роль фонового изображения. Информация, как и в классических схемах спекл-фотографии, извлекается из анализа полос Юнга, полученных при компьютерной обработке сдвоенных спекл-картин.

При аналогичных схемах регистрации более удобным и гибким в вычисли-

тельном плане оказывается корреляционный метод обработки изображений. В этом методе осуществляется поточечное корреляционное сравнение двух изображений случайной картины, разница между которыми содержит искомую информацию. В диссертации корреляционный метод применен для исследования оптических неоднородностей в прозрачных средах – для измерения градиентов оптической длины в газовом потоке и для визуализации напряжений в прозрачных твердых материалах.

Показано, что если в качестве исследуемой прозрачной среды, вносящей неоднородности в изображение, взять саму оптическую систему, строящую это изображение, то корреляционный метод можно применить для получения дисторсионных и хроматических характеристик оптических систем.

Исследована точность определения корреляционных сдвигов при варьировании различных параметров изображений и параметров вычисления корреляции. Это позволяет при корреляционных вычислениях оптимизировать выбор как используемых для измерений фоновых изображений, так и условий их регистрации и обработки.

Выводы

1. Реализованы схемы измерений деформаций и оптических неоднородностей в белом свете с помощью искусственных спеклов. Поперечные смещения поверхности измеряются в широком диапазоне (до 100 мм), точность измерений ~ 0.3 мм. При измерениях градиента оптического пути точность порядка 5×10^{-4} .

2. Реализована схема корреляционных измерений с искусственными спеклами в качестве фонового изображения для исследования оптических неоднородностей в газовом потоке. Получено распределение градиента оптической длины по исследуемому объекту с точностью лучше, чем 0.1 пикселя. При этом оценка минимально измеримого градиента показателя преломления в приближении плоского объекта составляет около $1 \times 10^{-6} \text{ см}^{-1}$. Минимально измеримый угол отклонения луча 2.5×10^{-6} рад.

Предложена и реализована схема корреляционных измерений градиентов оптической длины на базе искусственных спекл-картин для исследований механических и термических нагрузок твердых тел из прозрачных материалов. Упругие напряжения при поперечной нагрузке визуализируются с помощью корреляционных вычислений градиента оптической длины. Показано, что при поперечных нагрузках балки сечение поля смещений фоновой структуры соответ-

ствуется элюмам напряжений. Для прозрачных материалов с большой величиной коэффициента Пуассона такой метод при изгибающих нагрузках оказался намного более чувствительным, чем визуализация напряжений на основе эффекта фотоупругости.

3. Разработан новый метод измерения дисторсии оптических систем на основе корреляционной обработки изображений искусственных спеклов. Точность измерения дисторсионных искажений порядка 0.01%. Метод обладает тем преимуществом, что тестовая съемка выполняется предельно простым способом, без использования прецизионных измерительных систем и стендов, «с руки». Не делается никаких априорных предположений о свойствах функции дисторсии. В результате получается не полиномиальное приближение формы кривой дисторсии, а напрямую измеряется искажение в любой точке кадра.

4. Разработан и реализован способ оценки хроматических искажений по площади кадра путем корреляционной обработки пар областей изображения из разных цветовых каналов. Точность измерения хроматических искажений не хуже 0.001%.

5. Определены матрицы дисторсии ряда фотоаппаратов и сменных объективов, а также характеристики хроматических искажений для них. Для абсолютного большинства смещение красного и синего изображений максимально в углах кадра и находится в пределах одного пикселя. Дисторсионные искажения большинства объективов с фиксированным фокусом составляют около 0,5%. У объективов с перестройкой фокуса и у фотоаппаратов со встроенными объективами искажения находятся в диапазоне 2% - 4,5%. Для отдельных объективов показана зависимость величины дисторсионного искажения от величины фокусного расстояния.

6. На основе комплексного исследования субпиксельной точности измерений определены принципы выбора оптимальных параметров искусственных спеклов, используемых для корреляционных измерений, а также параметров корреляционного алгоритма:

- Вероятность заполнения изображения светлыми элементами должна быть 0,5, так как зависимость отношения сигнал – шум имеет максимум при $p = 0.5$.

- Масштаб фоновой картины следует выбирать таким, чтобы размер элемента изображения (спекла) на приемной матрице был как можно меньшим, но не меньше 2 пикселей.

- Рекомендуется аппроксимация формы корреляционного пика конусом.

- При сравнении двух изображений с разной резкостью (например, эталон-

ного изображения и фотографии) степень размытия более резкого изображения можно увеличить для уменьшения статистических ошибок измерения.

- Систематическая ошибка должна оцениваться для конкретных параметров пары изображений (средний размер элементов, радиус размытия) и затем учитываться при измерениях поля взаимных сдвигов этих изображений.

- При измерении больших сдвигов к увеличению точности приводит ступенчатая процедура: определение и компенсация крупномасштабных изменений на первом этапе обработки, и затем, на втором этапе, определение более тонкой структуры поля сдвигов изображений.

- Размер окна корреляции следует выбирать, исходя из геометрии задачи и априорных сведений о структуре поля сдвигов изображений. Увеличение окна улучшает статистические характеристики измерений, но может привести к потере локальности измерений.

При оптимальном выборе параметров возможно получение точности корреляционных измерений взаимного сдвига двух цифровых изображений до 0.01 пикселя.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Т.В.Миронова, В.А.Зубов, А.В.Крайский, Т.Т.Султанов, А.Г.Хлебников. Оптико-электронная обработка случайных бинарных транспарантов. Автометрия, № 2, с.9, 1988.

2. T. V. Mironova, T. T. Sultanov and V. A. Zubov. Digital Photography in Measurements of Shifts of Object Surfaces with Formation of the Speckle Structure In White Light. Journal of Russian Laser Research, 2004, Volume 25, Number 6, Pages 495-510.

3. Т.В.Миронова, В.Н.Боркова, А.В.Крайский, Т.Т.Султанов. Измерение градиентов оптической длины с помощью корреляционной обработки цифровых фотографий случайных картин. Краткие сообщения по физике ФИАН, М.,2006, №7, с. 38-41.

4. Т.В.Миронова, А.В.Крайский. Калибровка оптической системы корреляционным методом. Краткие сообщения ФИАН, М.,2008, №8, с. 14-24. (A. V. Kraisky and T. V. Mironova. Optical system calibration by the correlation method. Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2008, Volume 35, Number 8, Pages 231-237).

5. Т.В.Миронова, А.В.Крайский. Способ калибровки оптической системы. Заявка на получение патента РФ на изобретение от 17.04.2008 рег №2008114699. Положительное решение о выдаче патента на изобретение от 19.10.2009 г. Патент на изобретение №2381474. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 10 февраля 2010.

6. Т.В.Миронова, А.В.Крайский. Применение корреляционной обработки изображений для определения дисторсионных и хроматических искажений фотографических фотокамер и объективов. Измерительная техника, 2011.

7. Т.В.Миронова, А.В.Крайский, Е.М.Кудрявцев, Т.Т.Султанов. Применение корреляционного метода для анализа деформаций в прозрачных материалах. Краткие сообщения по физике ФИАН, 2012, т.39, №9, стр. 18–24.

Другие статьи и материалы конференций:

1. Т.В.Миронова, В.А.Зубов, А.В.Крайский, Т.Т.Султанов, А.Г.Хлебников. Оптико-электронная обработка информации с использованием для корреляционного анализа модифицированного интерферометра Маха-Цендера. Препринт ФИАН № 41, Москва, 1986.

2. Т.В.Миронова, В.А.Зубов, А.В.Крайский, Т.Т.Султанов. Система оптико-электронной обработки оптической информации. Тезисы докладов 6 Всесоюзной школы-семинара по оптической обработке информации, ч.1, с.90, изд. Фрунзенского политехнического института, 1986.

3. Т.В.Миронова, В.А.Зубов, А.В.Крайский, Т.Т.Султанов. Корреляционная обработка фотографических случайных бинарных транспарантов. Препринт ФИАН № 20, Москва, 1989.

4. Т.В.Миронова, В.А.Зубов, Т.Т.Султанов, А.Г.Устюхин. Анализ поворота поверхности методом спекл - интерферометрии – Труды VIII международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков". Москва 28 июня-1 июля 2005 года. Издательство МЭИ, с.258 – 251.

5. Т.В.Миронова, В.Н.Боркова, А.А.Емелин, В.А.Зубов, Т.Т.Султанов. Анализ оптических неоднородностей с формированием изображения спекл - структуры – Труды VIII международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков". Москва 28 июня-1 июля 2005 года. Издательство МЭИ, с.252 – 255.

6. Т.В.Миронова, В.Н.Боркова, А.И.Жуков, В.А.Зубов. Спекл - интерферометрия оптических неоднородностей в прозрачных средах – Труды VIII между-

народной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков". Москва 28 июня-1 июля 2005 года. Издательство МЭИ, с.256 – 259.

7. T.V.Mironova, T.T.Sultanov, V.A.Zubov. Measurements of shift and inclination of object surface with forming artificial speckle structure. In: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 6262, art. no. 62620I

8. Т.В.Миронова, В.Н.Боркова, А.В.Крайский, Т.Т.Султанов. Измерение градиентов оптической длины с помощью корреляционной обработки цифровых фотографий случайных картин., – Труды IX международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков". Москва 26 июня-29 июня 2007 года. Издательство МЭИ, с.52 – 55.

9. Т.В.Миронова, А.В.Крайский. Определение дисторсии и хроматической аберрации фотокамеры корреляционным методом, – Труды X юбилейной международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков". Москва 23 июня-26 июня 2009 года. Издательство МЭИ, с.256 – 259.

10. Т.В.Миронова, А.В.Крайский, Е.М.Кудрявцев, Т.Т.Султанов. Применение корреляционного метода для анализа механических напряжений в прозрачных материалах. – Труды XI международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков". Москва, 2011 год. Издательство МЭИ.

11. Т.В.Миронова, А.В.Крайский. Применение корреляционной обработки изображений для определения дисторсионных и хроматических искажений фотографических фотокамер и объективов. Научно-техническая конференция – семинар по фотонике и информационной оптике, Москва, МИФИ, 2011 г.

12. Т.В.Миронова, А.В.Крайский. Дисторсионные и хроматические характеристики некоторых фотокамер и объективов.– Труды XI международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков". Москва, 2011 год. Издательство МЭИ.