

ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ.П.Н.ЛЕБЕДЕВА РАН

На правах рукописи

МИРОНОВА ТАТЬЯНА ВЯЧЕСЛАВОВНА

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

Специальность 01.04.05 - ОПТИКА

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель -
кандидат физико-математических наук,
Крайский А.В.

Москва
2012

Содержание

Введение	3
1. Обзор литературы.	
1.1. Оптические методы измерений. Голографическая интерферометрия. Спекл-интерферометрия. Спекл-фотография.	11
1.2. Цифровая регистрация спекл-изображений.	16
1.3. Аналог спекл-фотографии в белом свете.	17
1.4. Связь спекл-фотографии и цифровой корреляции изображений.	17
1.5. Применение корреляционных методов для исследования деформаций и потоков жидкостей и газов.	18
1.6. Определение дисторсии оптической системы корреляционным методом.	19
1.7. Точность корреляционных измерений.	20
1.8. Измерительные возможности цифровых фотоаппаратов. Колориметрические и спектральные измерения.	21
2. Измерения с помощью искусственных спекл-картин в белом свете: цифровой аналог спекл-фотографии.	
2.1. Принцип измерения деформаций поверхности объекта.	23
2.2. Измерение бокового сдвига поверхности. Экспериментальные результаты.	25
2.3. Измерение поворота поверхности. Экспериментальные результаты.	29
2.4. Анализ оптических неоднородностей.	31
3. Корреляционная обработка изображений. Примеры применения. Исследование точности измерений.	
3.1. Принцип корреляционного метода измерений деформаций и градиентов оптической длины.	36
3.2. Исследование точности корреляционных измерений. Оценка статистической погрешности измерения сдвига в модели бинарных изображений	38
Исследование корреляционных характеристик в зависимости от свойств используемых изображений	43
3.3. Применение корреляционного метода для измерения градиентов оптической длины.	58

3.4. Применение корреляционного метода для анализа деформаций в прозрачных материалах.	63
4. Калибровка оптической системы корреляционным методом.	
4.1. Принцип определения дисторсии оптической системы.	69
4.2. Нахождение параметров проективного преобразования для приведения калибровочного объекта в соответствие ракурсу съемки.	70
4.3. Определение параметров внешнего ориентирования камеры по корреляционному соответствию областей калибровочного объекта и его изображения.	71
4.4. Реализация корреляционного способа калибровки оптической системы.	72
4.5. Экспериментальные результаты.	75
5. Заключение.	84
6. Литература.	88

Введение

Актуальность темы исследования

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 меньше расстояния между приемными элементами матрицы.

Цель диссертационной работы

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 работы

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.

Защищаемые положения

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 $\sim 0,3$ 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 $2,5 \times 10^{-6}$ 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. На основе исследования субпиксельной точности корреляционных измерений даны рекомендации для выбора оптимальных параметров искусственных спеклов, используемых для измерений, а также параметров корреляционного алгоритма. В зависимости от масштаба неоднородностей в измеряемом поле деформаций для разных задач имеется свой оптимальный выбор параметров. Благодаря оптимальному выбору используемых параметров получена точность корреляционных измерений взаимного сдвига двух цифровых изображений $\sim 0,01$ пикселя.

Практическая ценность работы

Разработан удобный в применении способ измерения дисторсии и хроматической абберации 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 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 в 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 выполнены автором лично.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на 6-ти конференциях в виде 10-ти устных докладов:

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

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

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

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

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

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

Публикации

Основные результаты опубликованы в 19 работах: 6 статей в реферируемых журналах, входящих в список ВАК, 1 патент на изобретение, 2 препринта и 10 тезисов конференций.

Статьи в реферируемых журналах.

1. В.А.Зубов, А.В.Крайский, Т.В.Миронова, 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, V 25, N 6, pp.495-510.

3. В.Н.Боркова, А.В.Крайский, Т.В.Миронова, 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. А.В.Крайский, Т.В.Миронова. 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, V 35, N 8, pp.231-237).

5. А.В.Крайский, Т.В.Миронова. 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. А.В.Крайский, Т.В.Миронова. Применение корреляционной обработки изображений для определения дисторсионных и хроматических искажений фотографических фотокамер и объективов. Измерительная техника, 2011, №5, с.26-29.

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

Тезисы конференций и препринты.

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

4. В.А.Зубов, Т.В.Миронова, 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 г. Издательство МЭИ, с.258 – 251.

5. В.Н.Боркова, А.А.Емелин, В.А.Зубов, Т.В.Миронова, 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 г. Издательство МЭИ, с.252 – 255.

6. В.Н.Боркова, А.И.Жуков, В.А.Зубов, Т.В.Миронова. Спекл - интерферометрия оптических неоднородностей в прозрачных средах – Труды VIII международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков". Москва 28 июня-1 июля 2005 г. 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, № 62620I

8. В.Н.Боркова, А.В.Крайский, Т.В.Миронова, 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 г. Издательство МЭИ, с.52 – 55.

9. А.В.Крайский, Т.В.Миронова. 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 г. Издательство МЭИ, с.256 – 259.

10. А.В.Крайский, Е.М.Кудрявцев, Т.В.Миронова, 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 г. Издательство МЭИ.

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

1. Обзор литературы

1.1. Оптические методы измерений. Голографическая интерферометрия. Спекл-интерферометрия. Спекл-фотография.

Методы голографической и спекл-интерферометрии широко используются для визуализации и измерения параметров изменений объектов при различных воздействиях [1-10]. В основе разнообразных методов голографической интерферометрии лежит принцип сравнения двух волновых фронтов, причем один из них или оба записывают и восстанавливают голографическим методом. Имеется несколько вариантов метода голографической интерферометрии: метод двух экспозиций, метод реального времени, метод усреднения во времени, стробоголографический метод.

Наиболее распространен метод двух экспозиций. Сначала получают голограмму исследуемого предмета в первоначальном состоянии, т. е. не нагруженного, не нагретого и не деформированного. Затем предмет подвергают внешним воздействиям и на ту же фотопластинку, без изменения взаимного расположения всех элементов схемы, записывают голограмму его измененного состояния. При восстановлении изображения с двукратно экспонированной голограммы наблюдается результат интерференции полей, существующих в разные моменты времени — во-первых, волнового поля, несущего информацию о первоначальном состоянии объекта, и, во-вторых, волнового поля, несущего информацию о его измененном состоянии. В результате на изображение объекта накладывается сеть интерференционных полос, по которым определяют изменения, происшедшие с объектом. Полосы локализованы в пространстве, причем не обязательно на поверхности объекта, и слегка смещаются и изменяют свою форму при изменении направления наблюдения. Анализ наблюдаемой интерференционной картины позволяет выявить созданные нагрузкой деформации. Метод двух экспозиций применяют для изучения поверхностной деформации тел, контроля сварных швов, обнаружения трещин, пузырей и т.д. Метод реального времени похож на метод двух экспозиций. Разница между ними заключается лишь в том, что при использовании реального времени вместо второй экспозиции голографическое изображение непосредственно «интерферирует» с предметом, с которого получена голограмма.

Третий метод голографической интерферометрии — метод усреднения во времени. Его назначение—изучение формы колебаний объектов при воздействии на них периодической нагрузки. Голограмма в этом случае экспонируется в течение промежутка времени, значительно превышающего период колебаний исследуемого объекта, и в

результате ее восстановления получается контурное изображение стоячих волн, установившихся на колеблющейся поверхности объекта. Не смещающиеся точки объекта называются узловыми и на интерферограмме имеют вид ярких пятен.

При использовании стробоголографического метода исследования вибраций экспонирование голограммы производится лишь в крайних положениях объекта синхронно с его колебаниями. Стробоголографический метод позволяет получать контрастные полосы при значительно больших амплитудах колебаний. Для этого получают голограмму неподвижного объекта и, проявив её "на месте", наблюдают через неё вибрирующий объект при импульсном освещении в моменты времени, соответствующие одному из крайних положений.

Перечисленные методы дают возможность эффективно контролировать и измерять деформации деталей и отдельных частей, определять распределение напряжений по объекту и наличие в них дефектов, поэтому их применяют в основном в дефектоскопии.

Голографическая интерферометрия находит применение в исследованиях как прозрачных, так и отражающих свет объектов. Различия, имеющиеся в исследовании объектов этих двух типов, не носят принципиального характера, хотя исследование прозрачных фазовых неоднородностей обычно выделяют в отдельное направление голографической интерферометрии. Это объясняется спецификой используемых схем и методов интерпретации результатов, которые, в свою очередь, определяются типичностью характера вносимых такими объектами фазовых искажений. К числу этих объектов относятся газовые потоки, ударные волны, плазма, тонкие пленки. Исследование методами голографической интерферометрии слабых фазовых объектов ставит своей конечной целью определить по распределению показателя преломления плотность газа, концентрацию атомов и электронов, температуру и другие параметры. Элементы оптических схем (линзы, призмы, пластинки, зеркала) вносят сильные фазовые возмущения, и применение к их исследованиям методов голографической интерферометрии имеет перед собой другую задачу - дает возможность проверить их качество.

Основным недостатком методов голографической интерферометрии является качественный характер информации, получаемой от объекта. Получение количественной информации требует громоздких математических вычислений и сложного аппаратного решения измерительного устройства, что приводит, в известной мере, к увеличению погрешности и трудности получения измерительной информации в реальном времени.

При работе в когерентном свете с диффузно отражающими или пропускающими объектами структура излучения кажется наблюдателю зернистой. Спеклы являются

результатом интерференции многих световых волн от различных точек объекта. Если предположить, что спекл-поле формируется в результате равномерного освещения диффузора (например, матового стекла) шириной L , то размер спеклов, наблюдаемых на расстоянии z от диффузора, пропорционален $\frac{\lambda z}{L}$.

Спеклы в значительной степени снижают качество фотографий, снятых в когерентном свете, и голограмм. Однако спекл-эффект можно успешно использовать для создания новых методов измерений. Спекл-интерферометрия, также как и голографическая интерферометрия, позволяет измерять смещения (статические и динамические) и исследовать форму оптически грубой поверхности с чувствительностью порядка длины волны света. Поэтому новые интерферометрические методы можно рассматривать как перенос методов классической интерферометрии на широкий класс объектов и систем, которые находились ранее за их пределами.

Если проводить общую классификацию, то в спекл-интерферометрии можно выделить два основных метода: корреляционную спекл-интерферометрию и спекл-фотографию. В каждом из этих методов оптически шероховатая поверхность регистрируется в начальном положении и смещенном относительно него, затем анализируется картина интерференционных полос.

Корреляционная спекл-интерферометрия — представляет собой измерительный метод, в котором происходит когерентное сложение (интерференция) поля, имеющего спекл-структуру, с плоской опорной волной или с другим полем, имеющим спекл-структуру. Чувствительность этого метода сравнима с чувствительностью голографической интерферометрии.

Развитие методов спекл-интерферометрии показало, что чувствительная к смещениям картина интерференционных полос может быть получена с помощью фотографии спеклов без опорного пучка. Это важное открытие легло в основу целого ряда методик для измерения разнообразных типов смещений и качества поверхности объектов. Обычно совокупность этих методик называют спекл-фотографией.

В методе спекл-фотографии предмет освещается единственным световым пучком. Часть пучка, рассеянного поверхностью предмета, собирается с помощью линзы на фотопластинку. Фотозапись на эту пластинку осуществляется дважды: до смещения предмета и после смещения.

Картины спеклов, записанные в плоскости изображения, приводят к появлению системы интерференционных полос, чувствительных к смещениям в плоскости предмета.

Главное преимущество метода состоит в простоте оптической схемы и относительной легкости представления и интерпретации результатов. Требования к механической стабильности значительно менее жесткие, чем при голографической интерферометрии. Чувствительность метода можно варьировать в процессе считывания информации, и она в большинстве случаев меньше, чем для голографической интерферометрии.

Рассмотрим схему измерения плоского перемещения (рис. 1.1) [8]. Оптическая система OS с фокусным расстоянием f и диаметром D образует изображение поверхности объекта в плоскости фотослоя. Расстояние до объекта l_0 и до изображения l_1 связаны уравнением $\frac{1}{l_0} + \frac{1}{l_1} = \frac{1}{f}$

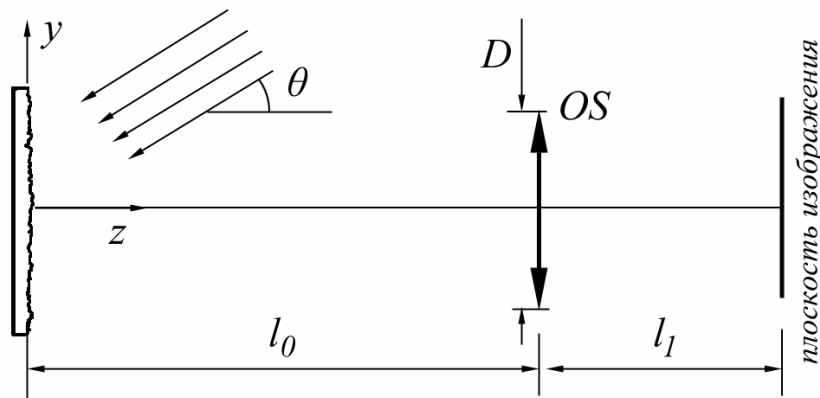


Рис.1.1. Схема регистрации спекл-структуры

Образованное в плоскости фотослоя изображение промодулировано случайной картиной спеклов, имеющих характерный размер b_s , определяемый апертурой оптической системы:

$$b_s \approx 1,22\lambda \frac{l_1}{D}. \quad (1.1)$$

Если объект сместится в перпендикулярном оптической оси направлении на величину L , относительная фаза для каждого из множества лучей, участвующих в образовании каждого спекла, останется неизменной. Следовательно, картина спеклов просто сместится в плоскости фотопластинки как целое на величину ML , где M - поперечное увеличение оптической системы. Перемещение картины спеклов для таких перемещений в плоскости не зависит от угла освещения θ . Чтобы измерить плоское перемещение объекта, пластинку экспонируют дважды - один раз до перемещения и один раз после него. Если предположить, что величина смещения L превышает размер спеклов

b_s , то на проявленной фотопластинке получается фотография пары идентичных спекл-картин, смещенных на расстояние ML . Расстояние ML для каждой пары спеклов можно непосредственно измерить путем микроскопического исследования пластинки. Альтернативным способом является когерентно-оптическая обработка фотоснимка, в результате которой смещение может быть представлено в виде картины интерференционных полос. Пластинку помещают в сходящийся лазерный пучок, образованный оптической системой OS_T с фокусным расстоянием f_T , как показано на рис. 1.2 (а).

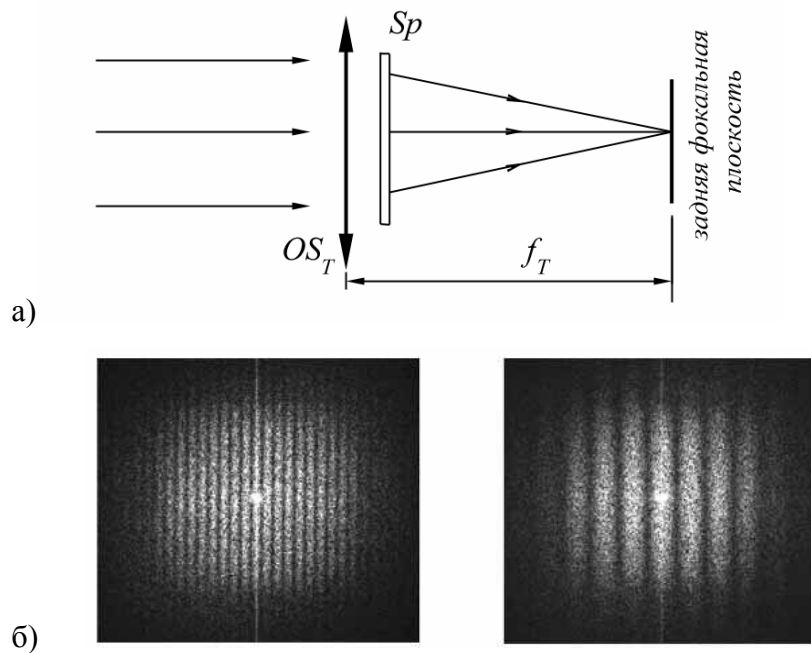


Рис.1.2. (а) Схема обработки спекл-фотографий. (б) Примеры распределений освещенности, полученных при обработке спекл-фотографий.

Распределение освещенности в задней фокальной плоскости линзы состоит из яркого центрального пятна, окруженного картиной спеклов, промодулированной полосами с косинусоидальным распределением интенсивности. Яркое центральное пятно образовано недифрагированным светом, прошедшим через фотопластинку, а модулированная картина спеклов образуется светом, дифрагирующим на спекл-структуре, зарегистрированной на фотопластинке. Полосы с косинусоидальным распределением образуются в результате того, что каждая пара спеклов действует как пара идентичных источников когерентного света, которые образуют полосы Юнга.

Ориентация полос нормальна к вектору L перемещения в плоскости. Величину L можно определить с помощью уравнения

$$I = I_0 \cos^2 \left[\frac{\pi b}{\lambda} \left(\frac{y}{l_0} + \frac{y_s}{l_s} \right) \right], \quad (1.2)$$

согласно которому, если спеклы в каждой паре на фотоснимке разделены промежутком ds , расстояние между полосами составляет $d_f = \lambda \frac{f_T}{d_s}$. Поэтому перемещение объекта в плоскости равно $L = \frac{\lambda f_T}{M d_f}$, где λ - длина волны лазерного излучения, используемого для образования полос; f_T - фокусное расстояние линзы, осуществляющей преобразование; M - увеличение оптической системы, использованной при получении спекл-фотографии; d_f - расстояние между полосами.

1.2. Цифровая регистрация спекл-изображений

С появлением и развитием цифровой регистрирующей техники исследователи начали использовать цифровую регистрацию для записи спекл-фотографий. По сравнению с обычной, фотографической, цифровая техника обладает рядом преимуществ, среди которых, конечно, основное – это простота получения изображения и дальнейшей его обработки. Но вместе с тем, цифровая регистрация приводит к проблемам, связанным с дискретизацией изображения. В работах [11 – 13] проведен детальный анализ влияния дискретности изображения на достоверность и точность получаемой информации, а также предложен алгоритм получения рассчитываемого по спеклограммам смещения с субпиксельной точностью. В настоящее время интерес к этому направлению исследований не снижается, и в печати продолжают появляться работы на эту тему [14 – 17]. Например, в работе [14] рассмотрены возможности восстановления голограммной структуры и изображения объекта по цифровой записи фурье-спеклограммы без использования опорного пучка. Обсуждены механизмы записи и восстановления информации и представлены результаты восстановления голограммной структуры и изображения плоских рассеивающих объектов различной формы. В работах [15] и [17] рассматриваются методы двухэкспозиционной спекл-фотографии с цифровой записью спекл-структуры дифракционного поля в дальней области дифракции и метод голографической интерферометрии с записью цифровой фурье-голограммы для измерения микросмещений отражающих рассеивающих объектов. Выполнено компьютерное моделирование процессов записи спеклограмм, формирования дифракционных гало с модулирующими интерференционными полосами, отражающими

смещение объекта. В работе [16] предложена схема для одновременного определения смещения и наклона исследуемой плоскости. В двух плечах интерферометра Майкельсона формируются не интерферирующие между собой пучки с перпендикулярной поляризацией. В первом плече получают фурье-образ объекта, а второе плечо формирует изображение в той же плоскости регистрации. Поскольку оптическое фурье-преобразование нечувствительно к смещениям, а при фиксации изображения не чувствуется наклон, такая схема позволяет одновременно и независимо определять смещение и наклон объекта путем двойной экспозиции – до и после сдвига.

1.3. Аналог спекл-фотографии в белом свете

В работах [18 – 20] предложены схемы измерения сдвига и наклона поверхности объекта при деформации. Но, в отличие от классических схем спекл-фотографии, вместо спекл-структуры, сформированной когерентным излучением, регистрация производится в белом свете и используется специальным образом сформированная бинарная картина, подобная спекл-структуре. Такая искусственная спекл-структура жестко привязана к исследуемой поверхности объекта, и для анализа сдвига или поворота поверхности объекта она регистрируется дважды в соответствии с двумя положениями поверхности, как это делается в обычных системах спекл-фотографии.

Аналогичный подход, когда вместо спекл-структуры, образованной лазерным излучением, используется искусственная спекл-картина для съемки в белом свете, для анализа оптических неоднородностей в прозрачных средах предложен в работах [21, 22].

Подробно эти схемы будут рассмотрены в главе 2.

1.4. Связь спекл-фотографии и цифровой корреляции изображений

Суть методов спекл-фотографии заключается в регистрации двух картин со случайной структурой. Одна картина соответствует исходному состоянию объекта, вторая - его измененному состоянию. Изменение состояния объекта приводит к смещению случайной структуры в плоскости регистрации. Анализ полученной информации заключается в образовании сдвоенной картины, выполнении операции преобразования Фурье и формировании спектра пространственных частот. Период, получаемой при этом картины полос, однозначно связан с величиной смещения случайной структуры в плоскости регистрации.

Можно изменить процедуру анализа двух картин со случайной структурой следующим образом. Применим операцию преобразования Фурье не к удвоенной картине спеклов, а к каждой из двух картин по отдельности, получая тем самым пространственные спектры изображений. А затем возьмем обратное фурье-преобразование от произведения одного пространственного спектра на комплексно сопряженный второй. Таким образом, получается функция кросс-корреляции между двумя изображениями.

Получение корреляционных функций возможно оптическими методами [23 – 27]. С увеличением производительности компьютеров и развитием компьютерных вычислительных методов корреляционная обработка изображений резко шагнула вперед и широко применяется в различных областях исследований.

Надо отметить, что терминология в области измерений с использованием лазерных или искусственных спекл-картин устоялась не сразу. В статьях прошлых лет термины «цифровая спекл-фотография» (digital speckle photography), «электронная спекл-фотография» (electronic speckle photography) могут относиться как к цифровой регистрации лазерных спекл-картин, так и к регистрации искусственно сформированных спеклов в белом свете. Специфика процесса обработки полученных изображений также отражается в названиях статей не всегда корректно. В некоторых источниках термин «цифровая спекл-фотография» относится к корреляционной обработке изображений. Но в последнее время для обозначения кросс-корреляционного анализа спекло-подобных изображений используют термин «цифровая корреляция изображений» (digital image correlation).

1.5. Применение корреляционных методов для исследования деформаций и потоков жидкостей и газов

На получении кросс-корреляций между изображениями объекта в нагруженном и ненагруженном состояниях основано исследование деформаций. В работах [29 – 38] прослеживается история вопроса от первых работ Саттона с соавторами [29, 30] на эту тему до недавних исследований [35, 37].

На различных вариациях корреляционного метода основаны также принципы измерения полей скорости и показателя преломления в потоках жидкостей и газов. Визуализация потока производится либо теневым фоновым методом, либо путем измерения перемещений взвешенных в потоке мелких частиц (трассеров). Различают несколько модификаций способов визуализации и, соответственно, методов обработки в зависимости от концентрации частиц. В качестве критерия обычно используется параметр

«плотность образов частиц». Это может быть либо анализ перемещений каждой частицы (PTV – Particle Tracking Velocimetry) при малых концентрациях частиц, либо кросскорреляционный метод (PIV - Particle Image Velocimetry), если концентрация частиц достаточно велика [39 – 45].

Теневой фоновый метод (BOS - Background Oriented Schlieren) был предложен Майером в 1999 и Ричардом в 2000 году [46 – 50]. Он позволяет получать распределение градиента показателя преломления исследуемой прозрачной среды путем цифровой обработки изображений, полученных с помощью простейшей оптической системы. Результат получается путем численного сравнения изображений некоторой фоновой картины, неискаженной и искаженной исследуемым процессом в прозрачной среде.

Метод постоянно развивается и совершенствуется в применении к различным экспериментам. В области аэродинамики визуализация и измерения параметров воздушных потоков проводятся как в аэродинамической трубе [51 – 54], так и в свободном полете [55], исследуются свободные струи [55 – 57] и вихри вблизи концов лопастей вертолетов [58]. Данный метод также очень удобен для исследования неоднородностей показателя преломления в жидкостях, работы [59 – 64] дают некоторое представление о состоянии дел в этой области. Наш вклад в этом направлении [65] описан в главе 3.

1.6. Определение дисторсии оптической системы корреляционным методом

В 2008 году нами было предложено в качестве исследуемой прозрачной среды, вносящей неоднородности в изображение, взять саму оптическую систему, строящую это изображение [66, 67]. Это привело к появлению еще одной области для применения корреляционной методики – к исследованию аберраций (в основном, дисторсии оптических систем).

Цифровые камеры широко используются для измерительных целей. Точность корреляционных измерений составляет меньше десятой доли пикселя приемной матрицы. Но это не снимает проблемы, возникающей при изменении ориентации камеры, – геометрические (дисторсионные) искажения при регистрации составляют не десятые доли, а десятки пикселей, до трех - пяти процентов от размера приемной матрицы.

Основы теории калибровки цифровых камер были заложены еще в семидесятые - восьмидесятые годы [68, 69]. Среди отечественных исследователей вопросы, касающиеся

калибровки цифровых камер, теории учета систематических искажений неметрических снимков в своих работах рассматривали Р.Н. Гельман [70], В.И. Юрченко [71] и другие.

В большинстве работ способ определения дисторсии основан на использовании калибровочного объекта, состоящего обычно из контрастных точек – узлов квадратной сетки. Калибровочный объект фотографируется, и по соответствию координат точек изображения и объекта определяется величина дисторсии в узлах сетки. Затем определяются полиномиальные коэффициенты дисторсии (в большинстве случаев только радиальной).

Довольно широкое распространение получил способ определения искажений снимков по степени кривизны линий, которые в природе прямые [68, 72].

Используется также метод компенсации дисторсии путем минимизации несоответствий положения точек объекта на разных изображениях [73].

Каждый из упомянутых способов предполагает использование какого-либо (в большинстве случаев полиномиального) приближения формы кривой дисторсии. В большинстве способов дисторсия полагается исключительно радиальной. Такие способы достаточны для исправления визуально заметной кривизны изображений, но для измерительных целей этого недостаточно. Для наиболее точной калибровки оптических систем используются прецизионные калибровочные стенды, требуется тонкая настройка положения калибруемой камеры. Затем следует достаточно сложный и долгий процесс обмера и расчетов. В работах [66, 67] предложен простой способ определения геометрических искажений в оптической системе. В данном методе не требуется прецизионных измерений и не делается никаких априорных предположений о свойствах функции дисторсии. Можно получать не только радиальную компоненту дисторсии, но и другие виды искажений, возможные в оптической системе (например, тангенциальную компоненту дисторсии, величину хроматической аберрации) для любой заданной точки кадра. Подробно эта тема освещена в главе 4.

1.7. Точность корреляционных измерений

Обычный цифровой фотоаппарат можно использовать как измерительный прибор в области геометрических (в частности корреляционных) измерений. Возникает вопрос точности таких измерений. В работе [34] рассматривалась зависимость точности корреляционных измерений от размера искусственных спеклов, от размера окна обработки и от вида корреляционного фильтра. В работе [36] для оптико-телевизионного корреляционного метода была проведена численная оценка влияния на точность

вычислений векторов перемещений таких внешних факторов, как гауссов и белый шум на изображении, размытие изображения, искажение яркости изображения. В главе 3 приведены исследования точности определения корреляционных сдвигов при варьировании различных параметров изображений и параметров вычисления корреляции для оптимизации выбора как используемых для измерений фоновых изображений, так и условий фотосъемки и обработки.

1.8. Измерительные возможности цифровых фотоаппаратов; колориметрические и спектральные измерения.

С помощью цифрового фотоаппарата можно выполнять не только различного рода геометрические измерения. Можно также измерять распределения интенсивности излучения и даже выполнять своего рода спектральные измерения по колориметрическому соотношению сигналов на матрице фотоаппарата. В современных камерах используются высококачественные твердотельные фотосенсоры. Это позволяет использовать недорогие коммерческие камеры в качестве регистрирующих устройств. Основной проблемой при этом является выполнение различных процедур обработки зарегистрированного изображения встроенным процессором камеры. Они проводятся с целью конвертации зарегистрированного сигнала в файл фотографического изображения, и при сохранении таких обработанных данных (в формате JPEG или TIFF) утрачивается линейность сигнала по интенсивности, ограничивается динамический диапазон, а также изменяется цветопередача.

Измерениям интенсивности излучения с помощью цифровых камер посвящены работы [78 – 83]. В работе [78] продемонстрированы возможности обычного фотоаппарата, позволяющего сохранять изображения в формате необработанных данных. Показано, что фотоаппарат можно применять для измерения пространственных распределений интенсивности лазерного излучения, и даны оценки точности измерений для цифровой камеры Canon EOS 400D. Если применяется процедура извлечения линейных данных, полный динамический диапазон камеры составляет 59 дБ, а линейный динамический диапазон при максимальном отклонении от линейности 2,7% - 58 дБ.

Спектральная чувствительность приемных матриц современных цифровых камер отличается от спектральной чувствительности глаза человека. Результатом этого несоответствия является получение данных, на основе которых теоретически невозможно восстановить правильные цвета. Так, различным с точки зрения человека цветовым ощущениям могут соответствовать одинаковые величины, полученные с помощью

сенсоров. Верно и обратное. Колориметрические измерения с помощью цифровых камер весьма затруднительны не только вследствие этого, но также и потому, что, как уже говорилось, встроенный процессор цифровой фотокамеры производит обработку зарегистрированного сигнала для улучшения визуального восприятия полученного изображения. Несмотря на это, имеется возможность не только колориметрических, но и спектральных измерений с помощью обычного цифрового фотоаппарата. В работах [84, 85] описан колориметрический способ для определения пространственного двумерного непрерывного распределения среднего значения длины волны узкополосного в каждой точке излучения. Предлагаемый способ позволяет сделать это без использования спектрального прибора.

2. Измерения с помощью искусственных спекл-картин в белом свете: цифровой аналог спекл-фотографии

2.1. Принцип измерения деформаций поверхности объекта

В классической схеме спекл-фотографии вместо регистрации спекл-структуры на фотопластинке с развитием цифровых методов регистрации стала применяться съемка цифровыми камерами. При этом обработка фотографий спеклов проводится также в цифровом виде. Кроме того, в спекл-фотографии нет опорной волны, и когерентность излучения нужна только для формирования спекл-пятен. Если заменить спекл-пятна на изображение с искусственной случайной структурой, то измерения можно проводить при съемке в белом свете. При этом система измерений аналогична спекл-фотографии. В работах [18 – 20] рассмотрены схемы измерения сдвига, поворота и наклона поверхности объекта при деформации. В отличие от классических спекл-интерферометрических схем, используется специальным образом сформированная бинарная картина, подобная спекл-структуре. Такая искусственная спекл-структура жестко привязана к исследуемой поверхности объекта, и измерения проводятся при различных взаимных смещениях камеры и поверхности объекта. Схема регистрации показана на рис.2.1.

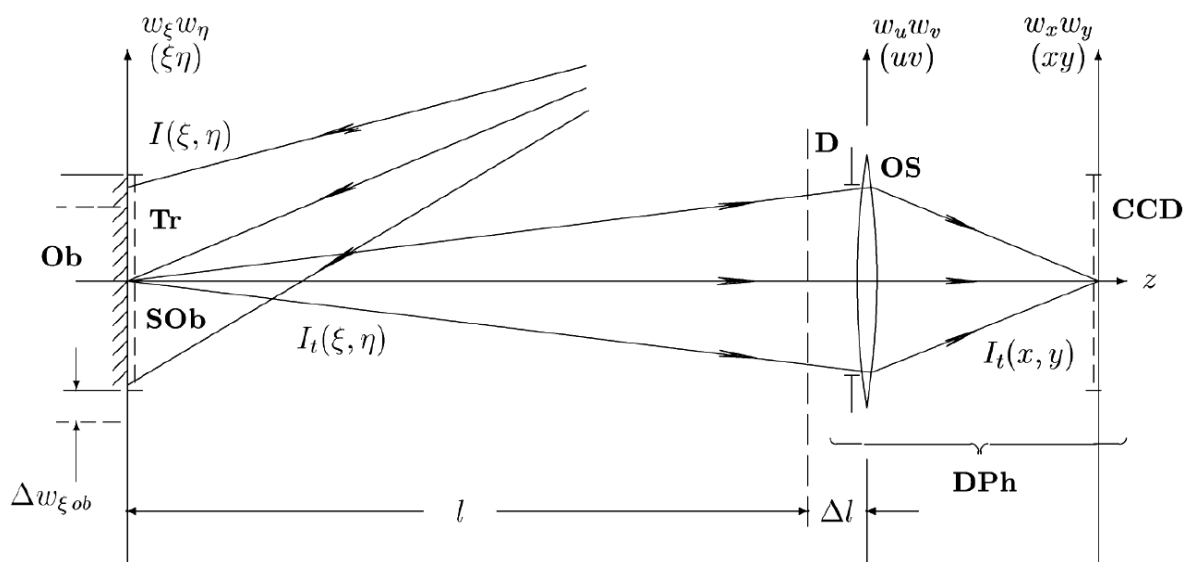


Рис. 2.1. Схема регистрации спекл-картин при измерениях деформации поверхности объекта.

На исследуемой поверхности объекта SOb расположен случайный бинарный транспарант Tr, заменяющий спекл-структуру. Координаты этой плоскости обозначены

$\xi\eta$. Координаты uv соответствуют плоскости оптической системы OS цифровой камеры DPh, а координатная плоскость xu – это плоскость регистрации, плоскость, в которой расположена приемная матрица фотоаппарата. Z – оптическая ось системы. Транспарант Tг освещается белым светом с однородным распределением интенсивности. Воздействие транспаранта на излучение описывается функцией $T(\xi, \eta)$. После транспаранта формируется распределение интенсивности, подобное спекл-структуре. Влияние дифракции и хроматические эффекты незначительны, так как дисперсия среды распространения света близка к нулю, а размер ячеек структуры достаточно велик. Оптическая система OS цифровой камеры, которая строит изображение спекл-картины (плоскость $\xi\eta$) в плоскость xu , ахроматична, и поэтому распространение света и влияние оптической системы можно рассматривать в данном случае без учета дисперсии в рамках физической оптики [86-88]. В плоскости регистрации xu типичный размер элемента спекл-структуры определяется размером неоднородностей в плоскости объекта $\Delta\xi_{\text{ир}}\Delta\eta_{\text{ир}}$ с учетом увеличения оптической системы: $\Delta x_{\text{ир}} = \Delta\xi_{\text{ир}} \frac{b}{a}$, $\Delta y_{\text{ир}} = \Delta\eta_{\text{ир}} \frac{b}{a}$. Для анализа сдвига или поворота поверхности объекта искусственная спекл-структура, жестко связанная с поверхностью, регистрируется дважды в соответствии с двумя положениями поверхности, как это делается в обычных системах спекл-интерферометрии.

Первая картина соответствует исходному состоянию транспаранта. Регистрируется первое распределение интенсивности

$$I_1(x, y) \approx T(-x(a/b), -y(a/b)).$$

Вторая картина соответствует смещенному либо повернутому на некоторый угол $\Delta\alpha$ состоянию транспаранта. Регистрируется второе распределение интенсивности

$$I_2(x-\Delta x, y) \approx T(-(x-\Delta x)(a/b), -y(a/b)).$$

Дальнейшая обработка состоит в формировании суммарного или разностного сигнала

$$I_{\pm}(x, y) = T(-x(a/b), -y(a/b)) \pm T(-(x-\Delta x)(a/b), -y(a/b)),$$

выполнении преобразования Фурье

$$F^{\pm}(\omega_x, \omega_y) \approx F_T(\omega_x, \omega_y) [1 \pm \exp[-i\omega_x \Delta x]],$$

где $F_T(\omega_x, \omega_y)$ - фурье-образ распределения интенсивности в плоскости xu . Переход к вещественным величинам дает для суммирования сигналов

$$U^+(\omega_x, \omega_y) = 4 F_T(\omega_x, \omega_y) F_T^*(\omega_x, \omega_y) \cos^2[\omega_x \Delta x/2]$$

и для вычитания сигналов

$$U^-(\omega_x, \omega_y) = 4 F_T(\omega_x, \omega_y) F_T^*(\omega_x, \omega_y) \sin^2[\omega_x \Delta x/2].$$

Для полученной периодической структуры после выбора анализируемого участка определяется ее период $\Delta\omega$, и рассчитываются величина сдвига Δx изображения и

величина смещения транспаранта $\Delta\xi$. В случае поворота поверхности вокруг оси, перпендикулярной ей, для известного удаления участка от оси поворота ρ определяется угол поворота $\Delta\alpha = \Delta\xi/\rho$.

В экспериментах, изложенных в главе 2, использовалась цифровая камера Sony DSC-F717 со встроенным объективом Carl Zeiss Vario-Sonnar с переменным фокусным расстоянием (9,7 – 48,5 мм), что соответствует фокусному расстоянию 38-190 мм для 35-миллиметровой пленочной фотокамеры. Эксперименты проводились при фокусном расстоянии 48,5 мм. Относительная апертура объектива 2,0 – 8,0, фокусировка автоматическая, от 0,5 м до бесконечности. Размер приемной матрицы 5 мегапикселей, ее линейный размер 16,9 мм.

Спекл-структура была промоделирована изображением, случайным образом заполненным черными и белыми элементами. Использовалась вероятность заполнения черными элементами 0,4, 0,5, 0,6. Размер элемента порядка 1 мм^2 , полный размер случайной картины $247 \times 412 \text{ мм}^2$. Печать производилась с некоторым размытием для приближения структуры искусственных спеклов к структуре настоящих.

Зарегистрированная информация обрабатывалась с помощью программного обеспечения AM Lab Hesperus 3.Ob [89]. Вычисления проводились в единицах, привязанных к приемным элементам матрицы фотоаппарата.

2.2. Измерение бокового сдвига поверхности. Экспериментальные результаты.

Оптическая схема измерения сдвига поверхности показана на рис.2.1. Масштаб изображения мог меняться с изменением расстояния от объекта до камеры с учетом автоматической фокусировки объектива. Чтобы привести масштаб изображения к геометрическим размерам объекта (коэффициент K_l размерностью мм/пикс), схема регистрации была откалибрована для набора расстояний l от некоторой фиксированной плоскости камеры до плоскости объекта $\xi\eta$. Калибровочная прямая, зависимость K_l от l , показана на рис.2.2. В качестве плоскости, связанной с камерой, была выбрана плоскость, проходящая через ось отверстия для крепления камеры к штативу. Очевидно, что эта плоскость в общем случае не совпадает с плоскостью uv , и $l \neq a$. Расстояние a от оптической системы до объекта, увеличение оптической системы a/b и величина l/b , определяемая из условий получения изображения, связаны следующим образом:

$$a = l + \Delta l, \quad \frac{1}{b} = \frac{a - f}{af} = \frac{l + \Delta l - f}{(l + \Delta l)f}, \quad \frac{a}{b} = \frac{l + \Delta l - f}{f} = \frac{l}{f} - \left(1 - \frac{\Delta l}{f}\right).$$

Коэффициент K_l зависит от размера пикселей приемной матрицы и от увеличения оптической системы

$$K_l \sim \frac{a}{b} = \frac{l}{f} - \left(1 - \frac{\Delta l}{f}\right).$$

Видно, что зависимость коэффициента K_l от l линейна, но не проходит через начало координат. Это позволяет определить Δl при $K_l=0$ и $l=l_0$:

$$\Delta l = f - l_0,$$

где l_0 – расстояние от начала координат до пересечения калибровочной прямой с осью абсцисс.

Для калибровки было выполнено три серии измерений, расстояние l варьировалось от 50 до 150 см, фокусировка камеры автоматическая. Каждое измерение проделывалось 4-6 раз с усреднением результатов. Калибровочный график показан на рис. 2.2. Он строился как зависимость коэффициента K_l (отношения длины отрезка на объекте в мм к размеру изображения этого же отрезка в пикселях приемной матрицы) от расстояния l от камеры до плоскости объекта. Калибровочная прямая построена по методу наименьших квадратов. Среднеквадратичное отклонение для зависимости K_l от l

$$\delta K_l = \left(\frac{\sum (K_{l\text{exp}} - K_{l\text{lin}})^2}{N - 1} \right)^{1/2} = 0,002,$$

где $K_{l\text{exp}}$ и $K_{l\text{lin}}$ – коэффициенты, соответственно, экспериментально полученный и найденный из графика, а N – число измерений.

По калибровочному графику была определена величина $l_0 = -8,7$ мм (для $K_l=0$). Затем для известного фокусного расстояния оптической системы $f = 48,5$ мм было рассчитано расстояние Δl от выбранной плоскости камеры до плоскости оптической системы uv : $\Delta l = 57,2$ мм. При получении соотношения между смещением в плоскости объекта и смещением в плоскости изображения нужно учитывать формулы для преобразования Фурье и калибровочный график. Это дает коэффициент

$$K_p = \frac{f}{b} = \frac{a - f}{a} = \frac{l + \Delta l - f}{l + \Delta l},$$

где Δl рассчитано выше, а l определяется геометрией эксперимента. В результате искомое смещение определяется как

$$\Delta \xi = K_l K_p \Delta x.$$

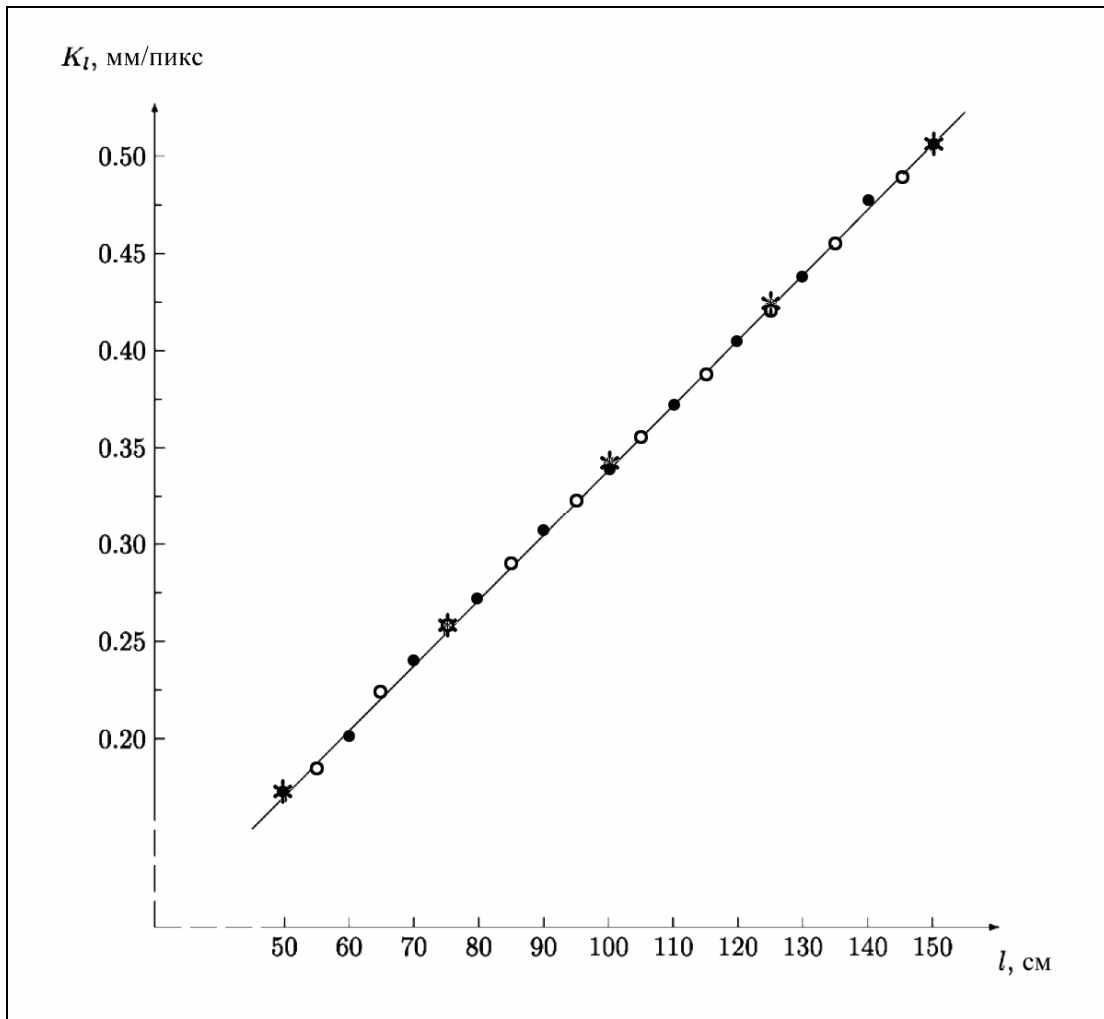


Рис. 2.2. Зависимость коэффициента K_l (отношения длины отрезка на объекте в мм к размеру изображения этого же отрезка в пикселях приемной матрицы) от расстояния l от камеры до плоскости объекта. Прямая построена по методу наименьших квадратов. Значки *, o и • отвечают трем наборам экспериментальных данных.

В эксперименте изображение картины, моделирующей спекл-структуру, было зарегистрировано для набора взаимных смещений камеры и объекта $\Delta\xi$ в диапазоне от 1 до 100 мм. Это моделировало сдвиг поверхности объекта. Пять серий измерений было проведено при значениях расстояний от выбранной плоскости камеры до плоскости объекта $l=80, 90, 100, 110$, и 120 см. Сравнивались величина сдвига поверхности $\Delta\xi_{\text{exp}}$, измеренная непосредственно, и величина сдвига поверхности $\Delta\xi_{\text{cal}}$, вычисленная по периоду полос в фурье-образе двоянного изображения. Смещение $\Delta\xi_{\text{exp}}$ считывалось по шкале микрометрического винта оптического стола. Частота интерференционных полос измерялась в единицах 1/пикс, в единицах пикселей приемной матрицы определялся сдвиг искусственной спекл-структуры $\Delta x = 2\pi / \Delta\omega_x$, который затем пересчитывался в

соответствии с калибровочными коэффициентами в величину $\Delta\xi_{cal}$. Типичный вид полос, полученных в фурье-образе двойной картины, приведен на рис. 2.3.

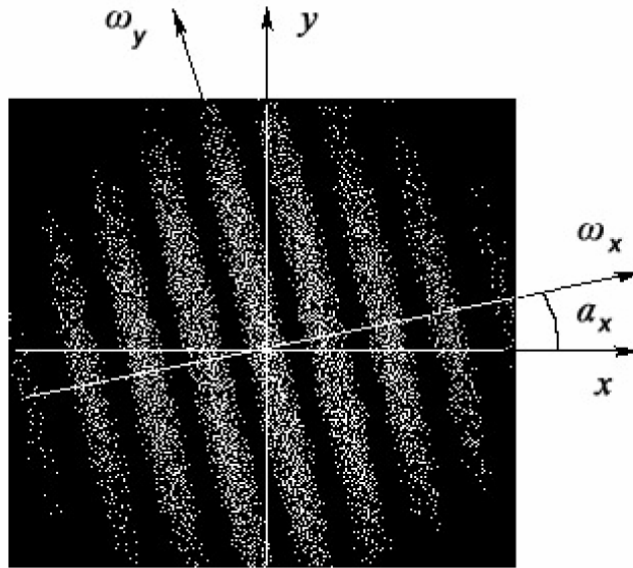


Рис.2.3. Пример фурье-образа двойного изображения. ω_x и ω_y - оси координат, α_x - угловое отклонение.

Сравнение измеренного и рассчитанного смещений показано на рис. 2.4. Для удобства координатные оси приведены в логарифмическом масштабе. Для полученных результатов определялось среднеквадратичное отклонение рассчитанных значений сдвига от истинных

$$\delta(\Delta\xi) = \left(\frac{\sum (\Delta\xi_{exp} - \Delta\xi_{cal})^2}{N - 1} \right)^{1/2}.$$

Эта величина изменялась в интервале от 0,19 до 0,32 мм при изменении $\Delta\xi_{exp}$ от 1 до 100 мм. Для большинства результатов для сдвига в интервале от 2 до 60 мм среднеквадратичное отклонение $\delta(\Delta\xi) \sim 0,27 - 0,29$ мм.

Итак, результаты показывают возможность измерений смещений поверхности в широком диапазоне (до 100 мм) с достаточной точностью ($\delta(\Delta\xi) \sim 0.3$ мм). Минимальное измеряемое смещение зависит от размера пятна искусственной спекл-картины (в данном варианте эксперимента 1 мм).

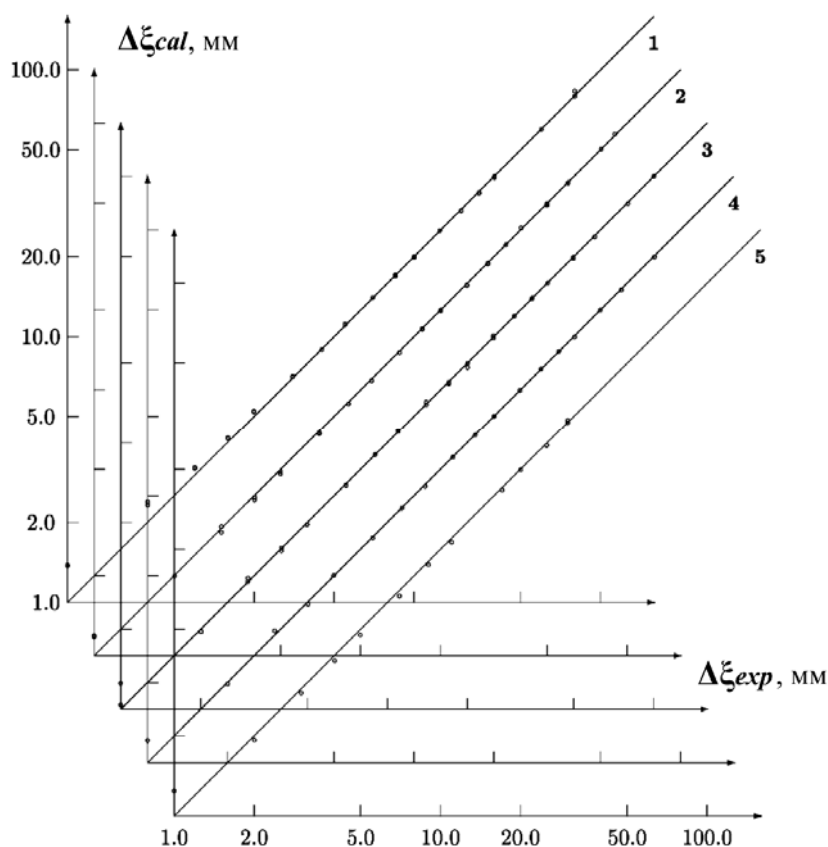


Рис. 2.4. Сравнение взаимных смещений камеры и объекта: $\Delta\xi_{\text{exp}}$ - измеренные непосредственно, $\Delta\xi_{\text{cal}}$ - рассчитанные. Расстояния от камеры до плоскости объекта: 1) $l = 80$, 2) 90, 3) 100, 4) 110 и 5) 120 см. Точки соответствуют экспериментальным результатам, прямые линии – точному совпадению $\Delta\xi_{\text{exp}}$ и $\Delta\xi_{\text{cal}}$.

2.3. Измерение поворота поверхности. Экспериментальные результаты.

В случае измерения поворота поверхности вокруг оси, перпендикулярной ей, для известного удаления участка от оси поворота ρ определялся угол поворота $\Delta\alpha = \Delta\xi / \rho$. Измерения проводились по схеме, аналогичной описанной выше. Моделирование поворота осуществлялось путем поворота фотокамеры с точностью до 0,5 угловой минуты. Серии измерений проводились для удаления фотокамеры от транспаранта 80, 90, 100, 110 и 120 см.

Обработка включала формирование сдвоенной картины транспарантов, выполнение преобразования Фурье и выделение участков с системой полос. Экспериментальные результаты для периода структуры полос получались в результате обработки 3 – 4 участков снимка с последующим усреднением. Обрабатываемые участки

соответствовали разным величинам удалений ρ (от 50 до 250 мм) участка от оси поворота. При усреднении погрешность измерений уменьшалась. В итоге сопоставлялись результаты непосредственно устанавливаемых углов поворота $\Delta\alpha_{\text{exp}}$ и углов поворота $\Delta\alpha_{\text{cal}}$, рассчитанных на основании измерения периода полос $\Delta\omega$ (рис.2.5). Графики соответствуют разным удалениям камеры от транспаранта от 80 см (нижний график) до 120 см (верхний график). Поскольку результаты были получены для различных масштабов изображений и различных их изменений при преобразованиях, то для сопоставления $\Delta\alpha_{\text{cal}}$ с $\Delta\alpha_{\text{exp}}$ проводилась нормировка результатов по одной из точек для каждой серии измерений. Была определена величина среднеквадратичного отклонения $\Delta\alpha_{\text{cal}}$ от прямой, соответствующей точному совпадению $\Delta\alpha_{\text{cal}}$ и $\Delta\alpha_{\text{exp}}$. Величина погрешности находится на уровне от $\delta\alpha \approx 1,7$ до $\delta\alpha \approx 2,9$ угл.мин.

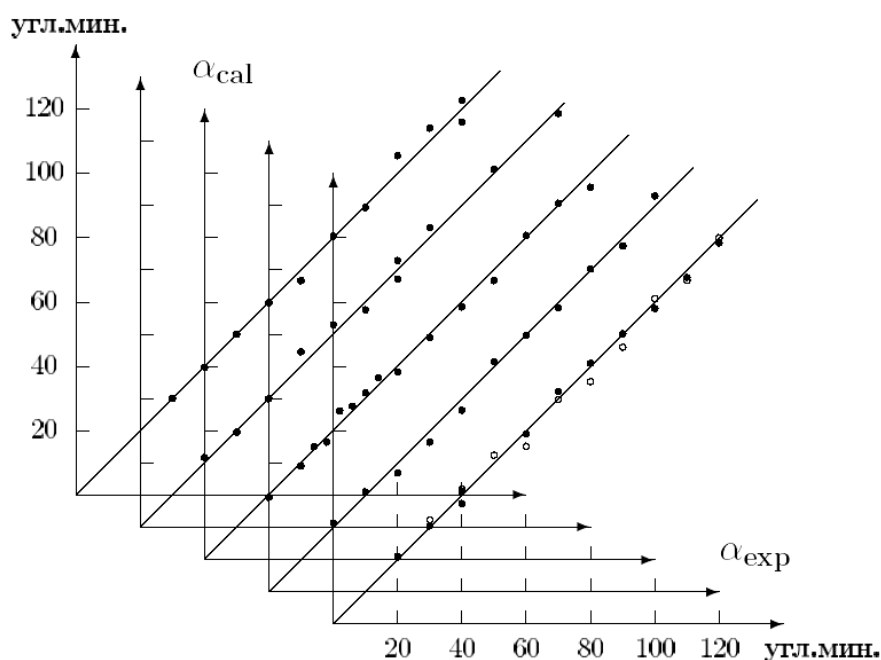


Рис. 2.5. Сравнение углов поворота камеры относительно объекта: α_{exp} - измеренные непосредственно, α_{cal} - рассчитанные. Расстояния от камеры до плоскости объекта (снизу вверх): 1) $l = 80$, 2) 90, 3) 100, 4) 110 и 5) 120 см. Точки соответствуют экспериментальным результатам, прямые линии – точному совпадению α_{exp} и α_{cal} .

2.4. Анализ оптических неоднородностей

Методы спекл-фотографии применимы не только для анализа деформаций и смещений, но и для анализа структуры оптических неоднородностей в твердых, жидких и газообразных объектах. Как и в случае анализа деформаций, анализируется изменение

изображения некоторой случайной структуры. Различие состоит в том, что при анализе деформаций искусственная спекл-картина жестко связана с исследуемым объектом, а при исследовании оптических неоднородностей изображение стационарной спекл-картины претерпевает искажения при прохождении излучения, формирующего ее изображение, через исследуемую среду. Суть методов заключается в регистрации двух картин со случайной структурой. Одна картина соответствует исходному состоянию объекта, вторая - его измененному состоянию. Изменение состояния объекта приводит к смещению случайной структуры в плоскости регистрации. Анализ полученной информации заключается в образовании сдвоенной 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.

Схема регистрации структуры неоднородностей прозрачного объекта **Ob** при зондировании белым светом приведена на рис. 2.6. Для формирования излучения со случайной структурой, моделирующей спекл-структуру, на входе располагается бинарный случайный транспарант **Tr**. Полученное излучение зондирует исследуемый объект, анализируемый участок которого при необходимости выделяется диафрагмой **D₀**. Для регистрации используется цифровая фотокамера **DPh**, содержащая оптическую систему **OS** с диафрагмой **D** и матрицу приемников **CCD**.

Воздействие транспаранта на исходное излучение с распределением интенсивности $I(\xi', \eta')$ описывается функцией $T(\xi', \eta')$ и формирует распределение интенсивности $I_T(\xi', \eta') = I(\xi', \eta') T(\xi', \eta')$, которое можно рассматривать как случайную спекл-структуру. На расстоянии l от транспаранта **Tr** располагается содержащий неоднородности исследуемый объект **Ob**. В качестве модельного объекта в одном варианте схемы использовался стеклянный клин с преломляющим углом $\Delta\varphi_s$. Клин давал отклонение лучей на угол $\Delta\theta_{zk} = \Delta\varphi_s (n - 1)$ и регулируемым образом поворачивался относительно оптической оси системы (угол α). В другом варианте использовались два стеклянных клина, один из которых регулируемым образом поворачивался относительно оптической оси системы. В результате изменялся суммарный преломляющий угол $\Delta\varphi_s$ и происходило отклонение излучения на угол $\Delta\theta_{zk} = \Delta\varphi_s (n - 1)$ и смещение в плоскости xu на расстояние $\Delta w_x = b\Delta\theta_{zk}$.

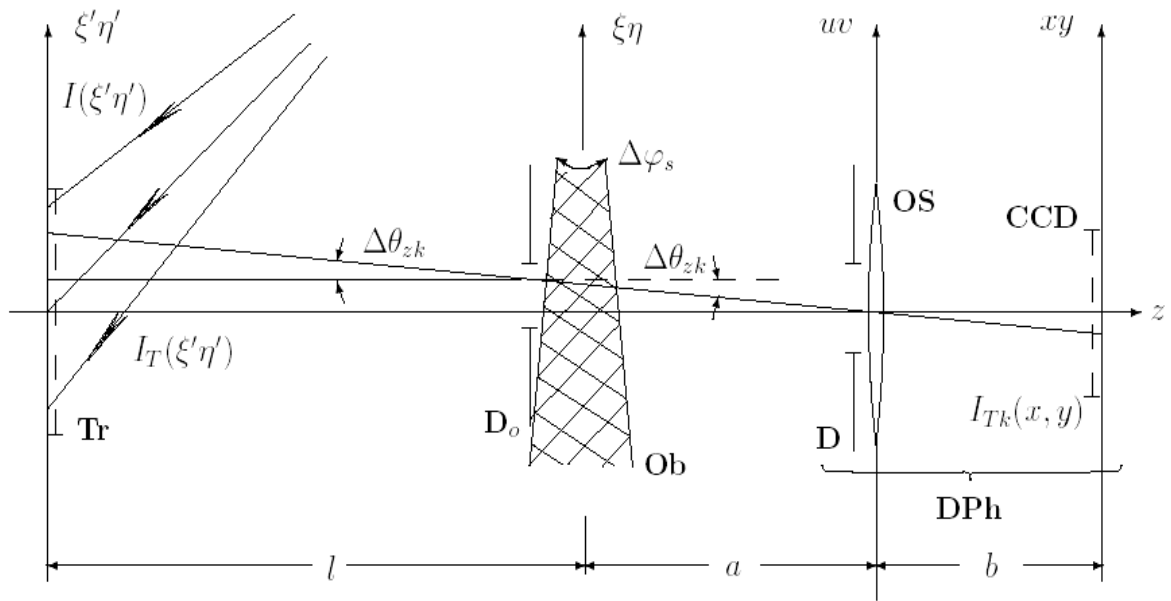


Рис.2.6. Схема регистрации структуры неоднородностей прозрачного объекта **Ob** при зондировании белым светом.

Для проведения анализа структуры неоднородностей объекта выполнялась регистрация изображения структуры случайного транспаранта на двух снимках, соответствующих двум состояниям объекта (параметры схемы см. в 2.1). Первая регистрация выполнялась при зондировании исходного состояния k -ого участка объекта для распределения интенсивности $I_{Tk}(x, y)$. Записывалось первое изображение $V_{1k}(x, y) \sim I_{Tk}(x, y)$. Вторая регистрация осуществлялась для измененного состояния k -ого участка объекта, приводящего к изменению направления распространения излучения для распределения интенсивности $I_{Tk}(x - \Delta x, y)$, и записывалось второе изображение $V_{2k}(x - \Delta x, y) \sim I_{Tk}(x - \Delta x, y)$.

Дальнейшая обработка информации включала сложение сигналов

$$V_s(x, y) = V_{1k}(x, y) + V_{2k}(x - \Delta x, y),$$

выполнение преобразования Фурье

$$F_{Sk}(\omega_x, \omega_y) \approx F_{Vk}(\omega_x, \omega_y) \{1 + \exp[-i\omega_x \Delta x]\}$$

и переход к вещественным величинам

$$U_{Sk}(\omega_x, \omega_y) = 2[F_{Vk}(\omega_x, \omega_y)]^2 \{1 + \cos[\omega_x \Delta x]\} = 4[F_{Vk}(\omega_x, \omega_y)]^2 \cos^2\left[\frac{\omega_x \Delta x}{2}\right].$$

Для полученной структуры определялся период полос, и рассчитывалась величина сдвига Δx . С учетом геометрии схемы рассчитывалась величина угла отклонения излучения $\Delta\theta_{zk} = \Delta x \frac{a+l}{bl}$ и суммарный преломляющий угол $\Delta\varphi_s = \Delta\theta_{zk} / (n - 1)$.

Было выполнено несколько серий измерений для поворота одного клина и несколько серий измерений для изменения преломляющего угла. В сериях с одним клином угол его поворота изменялся от восьми до тридцати градусов через два градуса. Геометрия схемы также варьировалась ($a + l = 30, 40, 50$ см, $l = 10, 20, 30, 40$ см). При повороте клина на угол α происходило смещение случайной структуры на расстояние Δx_α .

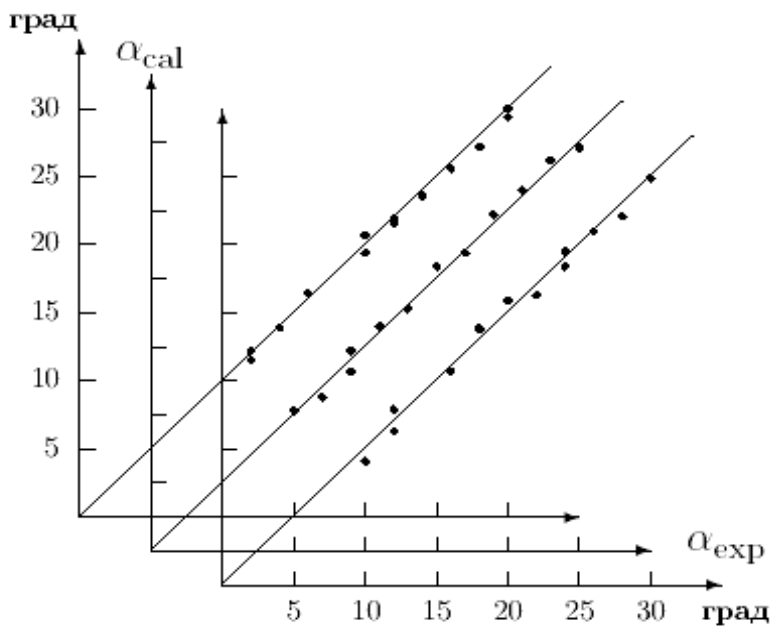


Рис.2.7. Сопоставление рассчитанных и установленных по нониусу углов поворота α_{cal} (точки) и α_{exp} . Расстояния от фонового изображения до оптической системы $a + l = 30, 40, 50$ см, до клина - $l = 20$ см.

Экспериментально выполнялись измерения периода полос в представлении пространственных частот. В соответствии с приведенными выше расчетами определялись величины смещения случайной структуры Δx_α и угла поворота α_{cal} клина. На графиках (рис. 2.7) приведены примеры сопоставления рассчитанных по периоду интерференционных полос величин угла поворота α_{cal} клина и углов поворота, установленных по нониусу, α_{exp} ($a + l = 30, 40, 50$ см, $l = 20$ см). Прямые соответствуют равенству углов α_{cal} и α_{exp} . Квадратичная погрешность для разных серий измерений составила $\delta\alpha_{cal} \sim 0,4 \div 0,7$ град.

В варианте с изменением преломляющего угла было выполнено несколько серий измерений для углов поворота одного из клиньев в диапазоне от четырех до тридцати

градусов с интервалами в два градуса и удалений оптической системы от транспаранта $a + l = 50, 60, 70, 80$ см и от объекта $a = 20, 30, 40, 50, 60$ см. Начальная ориентация клиньев выбиралась так, что суммарный преломляющий угол был нулевым. При повороте одного из клиньев на угол α происходило изменение суммарного преломляющего угла $\Delta\varphi_s$. Экспериментально выполнялись измерения периода интерференционных полос, и определялись величины отклонения излучения $\Delta\theta_{zk}$ и суммарного преломляющего угла двух клиньев $\Delta\varphi_s$.

Примеры полученных экспериментально результатов приведены на рис. 2.8. На графиках приведено сопоставление величин суммарного преломляющего угла $\Delta\varphi_{cal}$ двух клиньев, рассчитанного по периоду полос (точки), и фактически установленного преломляющего угла $\Delta\varphi_{exp}$. Линии соответствуют теоретически ожидаемым результатам.

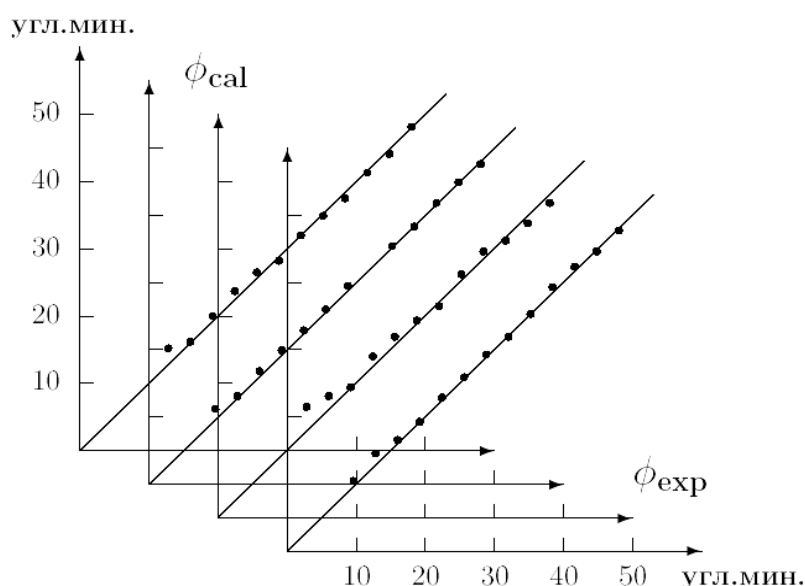


Рис. 2.8. Сопоставление величин суммарного преломляющего угла $\Delta\varphi_{cal}$ двух клиньев, рассчитанного по периоду полос (точки), и фактически установленного преломляющего угла $\Delta\varphi_{exp}$. Линии соответствуют теоретически ожидаемым результатам.

Итак, в этой главе 2 мы показали, что цифровой аналог метода спекл-фотографии в белом свете пригоден как для анализа деформаций, так и для измерений градиентов оптической длины. В обоих случаях анализируется изменение изображения некоторой случайной структуры. При анализе деформаций эта структура жестко связана с исследуемым объектом, а при исследовании оптических неоднородностей фиксируются искажения, которые изображение претерпевает при прохождении излучения через исследуемую среду. Регистрируется две картины. Первая соответствует исходному состоянию объекта, вторая - его измененному состоянию. Анализ полученной

информации заключается в образовании двоянного изображения, выполнении операции преобразования Фурье и формировании спектра пространственных частот. Период получаемой при этом картины однозначно связан с величиной смещения случайной структуры в плоскости регистрации. Если не применяется дополнительный сдвиг приемной матрицы между двумя регистрациями, то минимально измеримый с помощью данного метода сдвиг зависит (как и в классическом методе спекл-фотографии) от размера пятна используемой для измерений случайной картины, это не меньше 1-2 пикселей приемной матрицы. Пиксель используется здесь как инвариантная единица, так как реально измеримый сдвиг варьируется в зависимости от масштаба съемки. Это же справедливо и для точности измерений, для данной реализации метода она составляла около 1 пикселя. При расстоянии от камеры до исследуемой плоскости порядка метра это соответствует точности измерения смещения случайной структуры порядка 0,3 мм. В схеме регистрации оптических неоднородностей минимально измеримый градиент оптической длины составил для данной геометрии схемы 2×10^{-3} , точность измерений порядка 5×10^{-4} . Работы, изложенные в данной главе [18-22], были выполнены в 2004 году. С развитием возможностей вычислительной техники точность расчетов могла бы быть повышена, но логическое развитие способа обработки искусственных спекл-картин привело к использованию корреляционного метода. Он требует несколько больших вычислительных ресурсов, но более удобен для оператора и, кроме того, не имеет ограничения по величине минимально измеримого сдвига. Работы по вариантам реализации корреляционного метода изложены в главе 3.

3. Корреляционная обработка изображений. Примеры применения. Исследование точности измерений.

3.1. Принцип корреляционного метода измерений деформаций и градиентов оптической длины

Метод цифровой спекл-фотографии в белом свете, описанный в предыдущей главе, - это, по сути, компьютерное моделирование реальных физических процессов, происходящих при обработке двойных спеклограмм, когда по системе полос Юнга определяются величина и ориентация сдвига системы спеклов. Затем по этому сдвигу рассчитывается либо смещение объекта, с которым эта спекл-картина связана, либо параметры изменения среды прохождения излучения.

Для установления связи искомого сдвига с различиями двух изображений рассмотрим трансляционный сдвиг. Это – случай, когда объект или некоторая его область, рассмотрением которой мы пока ограничимся, сдвигается параллельно самой себе на расстояние $\vec{\tau}_0$ [65].

Тогда, если исходное распределение интенсивности $I_0(\vec{r})$, то на второй фотографии объекта распределение интенсивности $I_1(\vec{r})=I_0(\vec{r} + \vec{\tau}_0)$. Фурье-образы этих двух распределений

$$F_0(\vec{q})=\int_S d\vec{r} I_0(\vec{r})\exp(-i2\pi\vec{q}\vec{r}), \quad (3.1.1)$$

$$F_1(\vec{q})=\exp(i2\pi\vec{q}\vec{\tau}_0)F_0(\vec{q}),$$

$\vec{q}$ - это пространственная частота.

Квадрат модуля фурье-образа суммарного изображения $J(\vec{r})=I_0(\vec{r})+I_0(\vec{r} + \vec{\tau}_0)$ будет

$$|\Phi(\vec{q})|^2=2|F_0(\vec{q})|^2[1+\cos(2\pi\vec{q}\vec{\tau}_0)], \quad (3.1.2)$$

то есть по периоду полос и их ориентации определяется величина трансляционного сдвига. Правда, теряется знак этого сдвига. Такой процесс – это моделирование оптической обработки в классической спекл-фотографии. Компьютерная обработка допускает любую последовательность действий.

Изменим последовательность действий. Возьмем фурье-образ не суммарного изображения, а каждого по отдельности, а затем сделаем обратное фурье-преобразование

от произведения этих фурье-образов $\Phi(\vec{q})=F_0(\vec{q})F_1^*(\vec{q})$. При соответствующей нормировке такая процедура приводит к получению функции корреляции изображений

$$K_{\text{сз}}(\vec{\tau}) = \int_S d\vec{r} I_0(\vec{r}) I_1(\vec{r} + \vec{\tau}), \quad (3.1.3)$$

где S — область, по которой проводится интегрирование. В случае жесткого смещения или выбора на картине участка такого размера, что изображение перемещается как целое, без деформации, функция взаимной корреляции принимает вид:

$$K_{\text{сз}}(\vec{\tau}) = \int_S d\vec{r} I_0(\vec{r}) I_0(\vec{r} + \vec{\tau} - \vec{\tau}_0), \quad (3.1.4)$$

где $\vec{\tau}_0$ — вектор смещения для всего изображения, или вектор локального смещения в случае ограниченной области. Нетрудно видеть, что $K_{\text{сз}}(\vec{\tau})$ соответствует функции автокорреляции неискаженного изображения, смещенного на $\vec{\tau}_0$. По положению максимума определяется локальное значение $\vec{\tau}_0$ для данной области интегрирования, которую мы приписываем точке изображения, соответствующей центру окна.

Такой способ применим не только к модельным картинам, имитирующим спекл-структуру, но и к широкому кругу объектов, обладающих квазислучайно амплитудно-модулированными изображениями. Желательно, чтобы эти изображения имели малый радиус корреляции. В работах [90 – 92] рассматриваются примеры применения корреляционного метода к естественным объектам, в частности, к фотографиям ландшафта с самолета, а также к обработке космических снимков поверхности Земли. Если роль случайной картины играет изображение исследуемого деформируемого или сдвигаемого объекта, полученная величина смещения соответствует величине деформации с учетом увеличения оптической системы. Если же исследуется прозрачный объект, то величина сдвига фонового изображения пропорциональна градиенту показателя преломления.

Выполняя в каждой точке изображения объекта описанную процедуру, мы строим поле смещений одного изображения относительно другого. Следует обратить внимание на то, что здесь мы получаем не модуль величины смещения, а ориентированное смещение, усредненное по площади окна. После обработки двух снимков мы получаем величину сдвига возмущенного изображения в каждой точке (пикселе).

Корреляционные измерения, на которых базируются результаты, изложенные в 3 и 4 главах, выполнены при обработке цифровых изображений с помощью программного пакета, написанном автором на языке C++ в среде программирования C++Builder.

3.2. Исследование точности измерений

Цифровая регистрация изображений, используемых для измерений (например, корреляционных) обладает рядом преимуществ, среди которых основное – это простота получения изображения и дальнейшей его обработки. Но, вместе с тем, цифровая регистрация приводит к проблемам, связанным с дискретизацией: непрерывная функция заменяется набором дискретных отсчетов, и, к тому же, значения функции в этих отсчетах квантуются по некоторому набору дискретных уровней. В данной главе рассматривается влияние дискретности изображения на точность получения субпиксельного значения положения корреляционного пика, проводится оценка величины статистического разброса измерений, а также исследуется зависимость систематической и статистической ошибок от свойств обрабатываемых изображений.

Оценка статистической погрешности измерения сдвига в модели бинарных изображений.

Рассмотрим оптическую схему формирования автокорреляционной функции (аналогично [24-27]) для бинарного изображения, образованного случайным заполнением квадратной сетки прозрачными и черными элементами (пропускание 1 и 0). Вероятность заполнения прозрачными элементами равна p , число элементов в рабочем окне – N . Одно изображение фиксировано, а другое, идентичное, сдвигается вдоль первого по одной из координат, и суммарное пропускание формирует сечение двумерной функции корреляции по этой координате. Величина максимума корреляционной функции при совпадении изображений пропорциональна числу прозрачных элементов, которое колеблется вокруг среднего значения $\langle I_{cor} \rangle \sim pN$. Для нормального закона распределения величина этого разброса

$$\sigma_{cor} \sim \sqrt{Np(1-p)}. \quad (3.2.1)$$

Если изображения не совпадают, то средний сигнал (фон корреляционной функции) пропорционален квадрату вероятности заполнения $\langle I_{back} \rangle \sim p^2 N$,

$$\sigma_{back} \sim 2p\sqrt{Np(1-p)}. \quad (3.2.2)$$

При сдвиге на одну ячейку сетки в изображении заменяется $2\sqrt{N}$ элементов, число прозрачных элементов при этом в среднем остается тем же, а среднеквадратичное отклонение

$$\sigma_{back}^{\pm 1} \sim 2p\sqrt{2\sqrt{N}p(1-p)}. \quad (3.2.3)$$

Расчеты проиллюстрированы на рис.3.2.1 для $N=64$ и $p=0,5$. Набор кривых – это вариации сечений автокорреляционной функции бинарного изображения, рассчитанной по различным участкам изображения размером 8×8 информационных элементов. Видно, что и величина корреляционного пика, и величина фонового сигнала варьируются в значительных пределах.

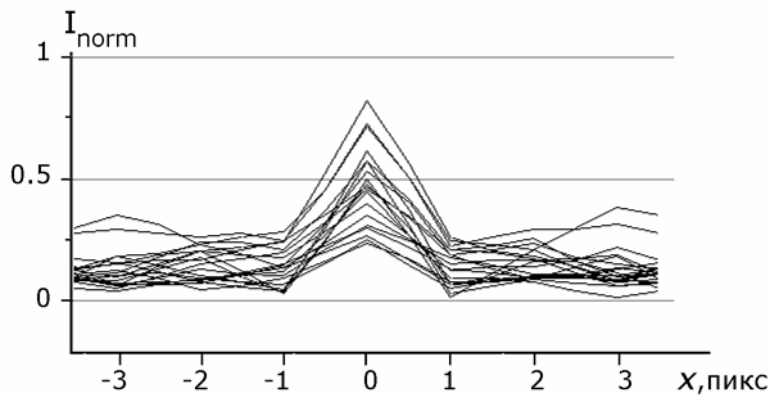


Рис.3.2.1. Вариации сечения корреляционной функции для различных участков размером 8×8 элементов для бинарного изображения с вероятностью заполнения прозрачными элементами $p=0,5$.

Вычисление положения корреляционного пика с субпиксельной точностью производится по значениям корреляционной функции в окрестности пика. Обычно используется три алгоритма оценки положения максимума [93] – алгоритм центра масс, параболический и гауссов. Для зависимости только от одной координаты (то есть для трех измеренных значений R_0 , R_{-1} и R_{+1}) оценочные функции выглядят следующим образом:

$$\Delta x_{CenterOfMass} = \frac{R_{+1} - R_{-1}}{R_{-1} + R_0 + R_{+1}}$$

$$\Delta x_{Parabolic} = \frac{R_{-1} - R_{+1}}{2(R_{-1} - 2R_0 + R_{+1})}$$

$$\Delta x_{Gaussian} = \frac{\ln R_{-1} - \ln R_{+1}}{2(\ln R_{-1} - 2\ln R_0 + \ln R_{+1})}$$

Автокорреляционная функция бинарных изображений имеет треугольное сечение, и поэтому логично оценивать положение корреляционного пика не перечисленными выше функциями, а в предположении, что форма пика – конус. Это дает для оценочной функции

$$\Delta x_{Conus} = \frac{R_{+1} - R_{-1}}{2(R_0 - R_{-1})}, \quad (3.2.4)$$

а для статистической ошибки субпиксельного расчета положения максимума зависимость от числа информационных элементов и вероятности заполнения:

$$\delta(N, p) \sim \sqrt{\frac{p}{N^{3/2}(1-p)}} \quad (3.2.5)$$

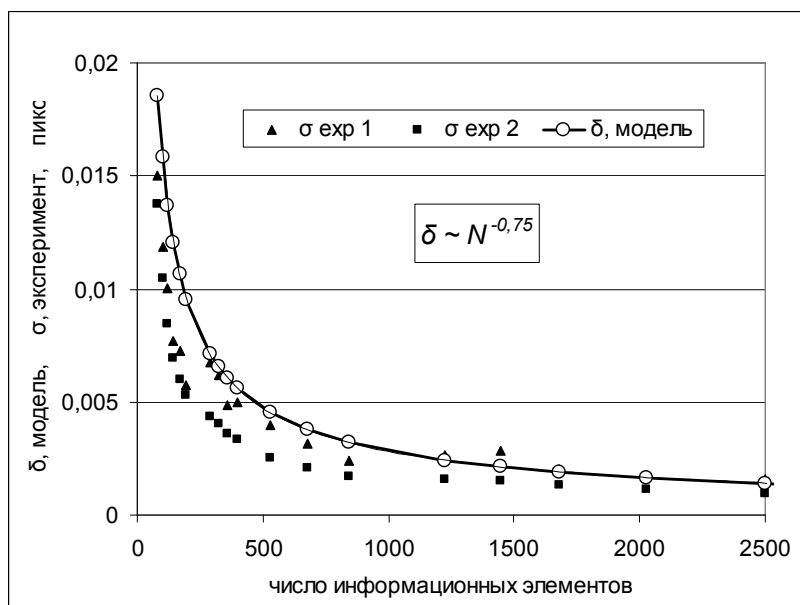


Рис.3.2.2. Зависимость величины теоретической оценки статистической ошибки δ и среднеквадратичного отклонения σ , полученного в корреляционных расчетах с бинарными изображениями, от числа информационных элементов в рабочем окне.

Зависимость статистической ошибки δ , полученной в модели бинарных изображений, от числа элементов в рабочем окне показана на рис.3.2.2 вместе с величинами среднеквадратичного отклонения σ , полученными в двух сериях корреляционных измерений взаимного сдвига двух бинарных изображений на один информационный элемент.

На рис.3.2.3 показана зависимость теоретической оценки статистической ошибки δ от вероятности заполнения изображения белыми (прозрачными) элементами. С увеличением числа прозрачных элементов статистическая ошибка растет. При выборе изображений, предназначенных для различных корреляционных измерений, нужно не

только минимизировать статистическую ошибку, но также учитывать величину превышения корреляционного сигнала над фоновым. Поведение этой величины, $I_{cor} - I_{back}$, рассчитанной в модели бинарных изображений, показано на рис.3.2.4. Зависимость превышения сигнала над фоном от числа элементов линейная. Зависимость от вероятности заполнения при больших значениях N имеет максимум при $p = 0,5$. При малом числе информационных элементов максимум зависимости немного сдвигается в сторону уменьшения вероятности.

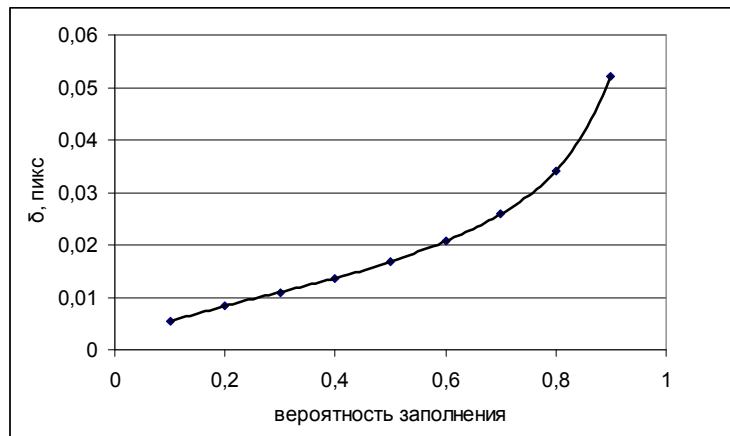


Рис.3.2.3. Зависимость теоретической оценки статистической ошибки δ от вероятности заполнения изображения белыми элементами.

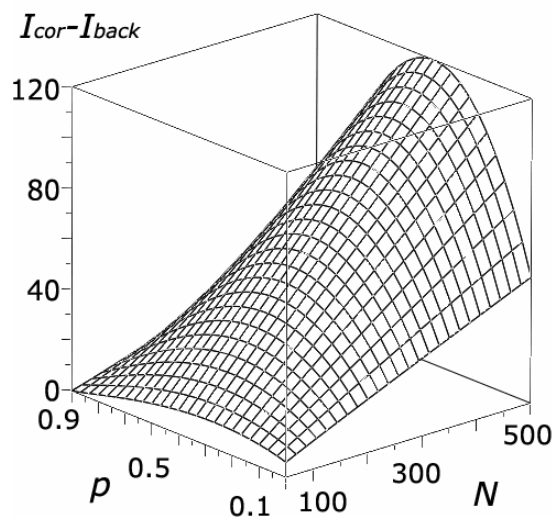


Рис.3.2.4. Зависимость теоретической оценки превышения корреляционного сигнала над фоновым от вероятности заполнения изображения белыми элементами p и от числа информационных элементов в рабочем окне N .

Модель также позволяет рассмотреть зависимость статистической ошибки δ от величины измеряемого взаимного сдвига изображений. Характер этой зависимости

показан на рис.3.2.5 для фиксированных величин вероятности заполнения и размера участка изображения. Статистическая ошибка растет пропорционально квадратному корню измеряемого смещения: $\delta x \sim \sqrt{\Delta x}$.

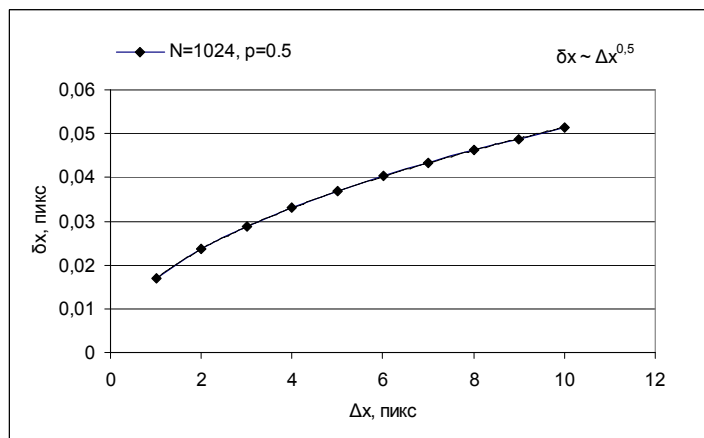


Рис.3.2.5. Зависимость статистической ошибки δ (модельный расчет) от величины измеряемого взаимного сдвига изображений.

Исследование корреляционных характеристик в зависимости от свойств используемых изображений.

Для субпиксельного расчета смещения необходима адекватная аппроксимация функции взаимной корреляции. Как уже упоминалось, для бинарных изображений наиболее подходит аппроксимация формы пика конусом. С учетом типичного вида автокорреляционных пиков размытых изображений (см. рис.3.2.6) аппроксимация проводилась в двух вариантах – конической поверхностью и поверхностью вида

$$z = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f.$$

Качество аппроксимации проверялось по величине среднеквадратичного отклонения при определении известного постоянного по площади сдвига двух изображений друг относительно друга. В целом оказалось, что аппроксимация конусом окрестности корреляционного пика дает лучшие результаты для изображений с резкими перепадами яркости. Для размытых изображений разница между двумя вариантами аппроксимации исчезает. Для изучения влияния степени размытости изображений на стабильность и точность определения положения корреляционного пика были смоделированы изображения с постоянной по площади фиксированной степенью размытия. Из бинарного черно-белого изображения были получены полутоновые

изображения с разным радиусом размытия. Это отвечало толщине полутонного перехода между черными и белыми элементами. Использовалось размытие по Гауссу:

$$G(u, v) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(u^2+v^2)/(2\sigma^2)} \quad (3.2.6)$$

Радиус размытия σ менялся от 0 до 4 пикселей (при работе с изображениями с более крупными элементами радиус размытия можно было увеличивать вплоть до 8 пикселей). Пример изображения, размытого в разной степени, и его сечения показан на рис. 3.2.6. По горизонтальной оси отложена координата вдоль изображения (в пикселях), по вертикальной – интенсивность (интервал 0 – 255).

Исследовалась стабильность определения смещения в зависимости от степени размытости изображения, то есть от радиуса размытия. Изучалось поведение величины среднеквадратичного отклонения при определении положения пика корреляционной функции. Были взяты два изображения, одинаково размытые и сдвинутые друг относительно друга на известное расстояние. Определение положения производилось по окну 128x128 пикселей, усреднение проводилось по 1000 точек изображения. Полученная зависимость показана на рис. 3.2.7. Видно, что, чем меньше размытие, то есть, чем ближе изображение к строго бинарному, тем выше стабильность определения положения максимума корреляционного пика при аппроксимации.

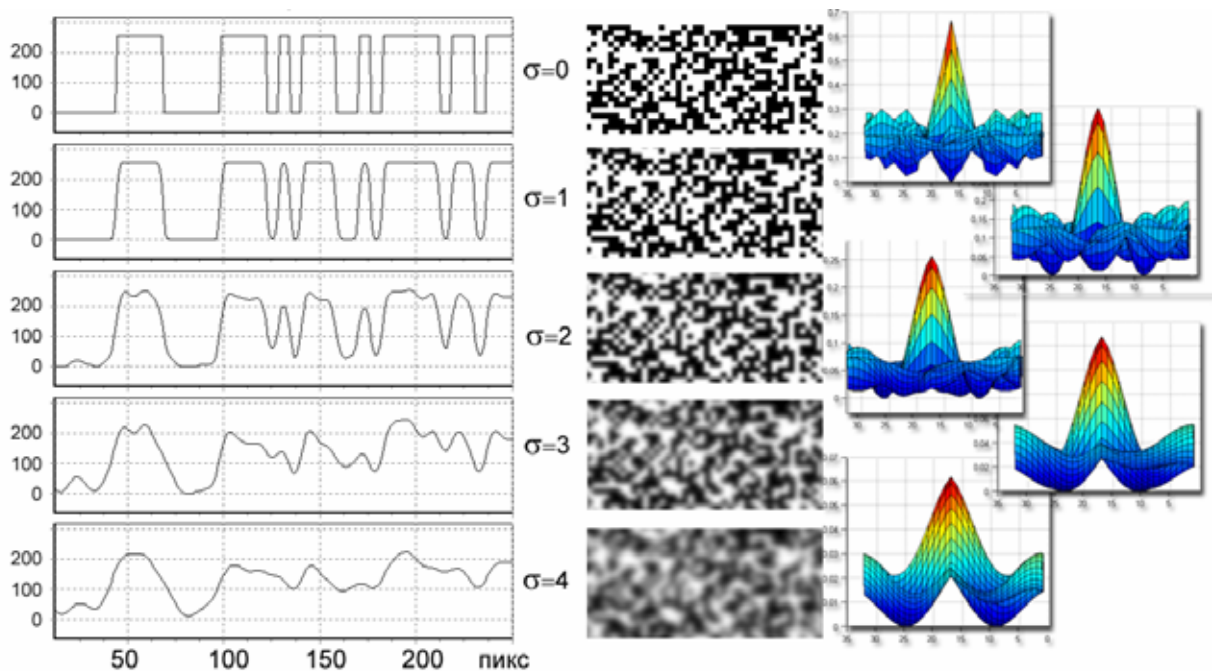


Рис. 3.2.6. Пример бинарного изображения с размером информационного элемента 6x6 пикселей и полученных из него изображений с разным радиусом размытия ($\sigma = 0, 1, 2, 3, 4$), их сечения и форма автокорреляционных пиков (размер окна 32x32 пикс).

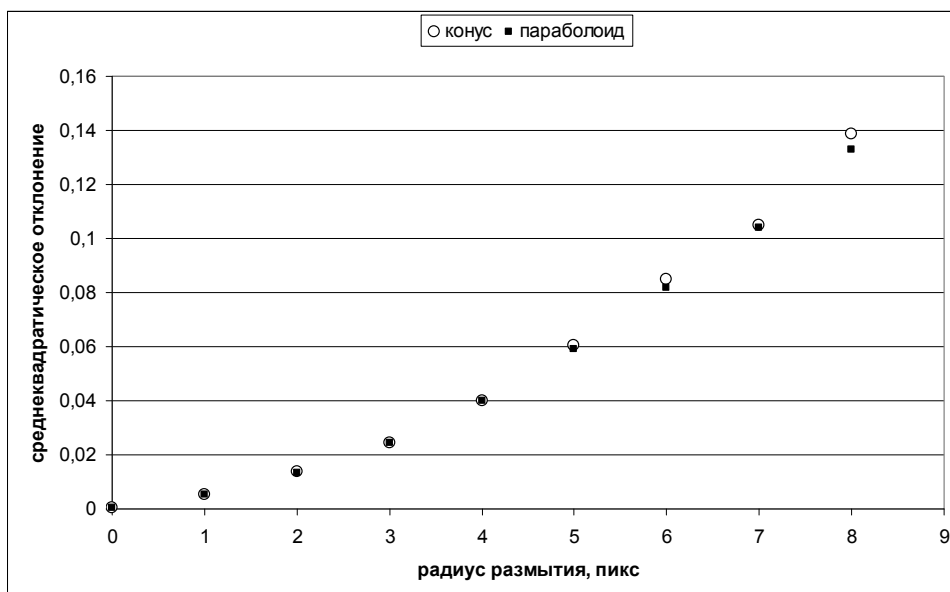


Рис.3.2.7. Зависимость величины среднеквадратичного отклонения при определении положения пика корреляционной функции от радиуса размытия изображений. Аппроксимация проводится параболической и конической поверхностью.

Но строго бинарных изображений (фотографий) не существует, даже в хорошо сфокусированном изображении черно-белого объекта черные и белые пиксели не граничат друг с другом непосредственно, всегда есть полутона. Возникает вопрос, какой аппроксимацией лучше пользоваться – параболической или конической. Для корреляционных функций, получаемых оптическим методом, в работах [24-27] было показано, что в случае корреляционной обработки бинарных транспарантов форма пика близка к конической. На графике (рис.3.2.8) показана зависимость отношения среднеквадратичных отклонений при аппроксимации формы пика корреляционной функции параболической и конической поверхностью от радиуса размытия обрабатываемых изображений. Видно, что при радиусе размытия до $\sim 2,5$, лучшие результаты дает аппроксимация формы корреляционного пика конусом. Радиус размытия 1 пиксель на практике означает, что полутоновой переход между черным и белым в изображении составляет 5 пикселей (что соответствует размеру ядра свертки при компьютерном (дискретном) размытии изображений). При радиусе размытия 2 используется матрица 9×9 , то есть полутоновой переход составляет около 9-ти пикселей. Это намного больше, чем ширина полутонного перехода в обычном изображении контрастного объекта. Поэтому можно сделать вывод, что при измерениях, в особенности с использованием изображений бинарных объектов, для субпиксельного определения положения максимума корреляционной функции следует пользоваться аппроксимацией

формы пика поверхностью конуса. В дальнейшем это оговариваться не будет, а приведенные значения корреляционных сдвигов рассчитаны при аппроксимации конусом.

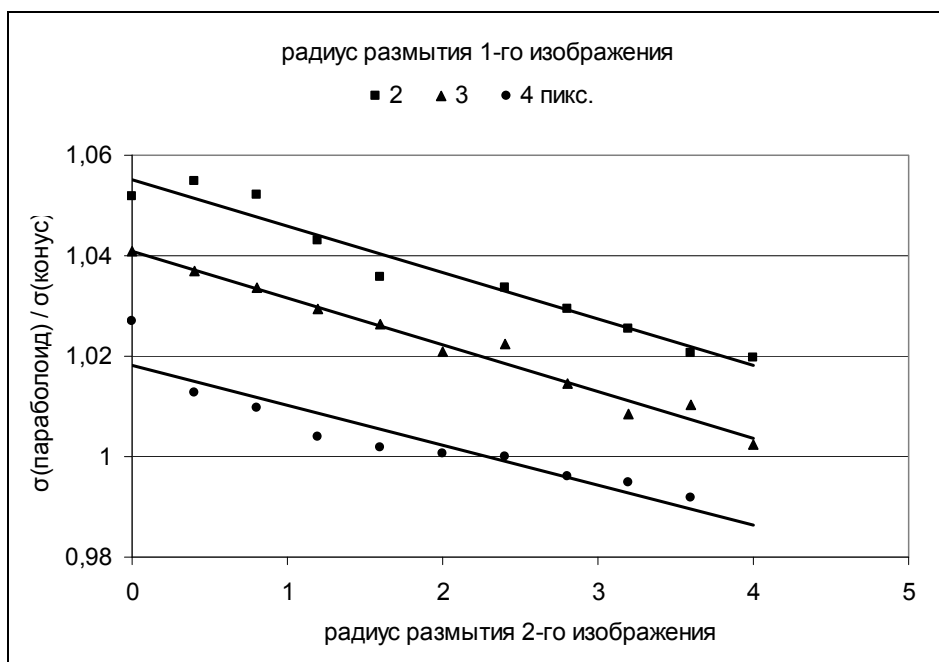


Рис.3.2.8. Зависимость отношения среднеквадратичных отклонений при аппроксимации формы корреляционного пика параболической и конической поверхностями от радиуса размытия изображений.



Рис.3.2.9. Зависимость величины шума от степени размытости одного изображения при фиксированном значении размытости второго. Четыре кривые соответствуют значениям фиксированного радиуса размытия одного из изображений – 0, 2, 3, 4.

Изображения одного и того же объекта, которые используются для корреляционных измерений, могут отличаться по степени размытости, по контрасту, по яркости, по зашумленности, и т.д. Поэтому важно представлять, как влияет на точность измерений разница в параметрах используемых изображений. Мы исследовали величину шума при различных радиусах размытости изображений, т.е. рассчитывали величины среднеквадратичного отклонения при определении положения пика корреляционной функции. Определение положения производилось по окрестности точки 32х32 пикселя. Усреднение проводилось по 10000 точек двух несмещенных друг относительно друга изображений. Первое изображение бралось с фиксированным радиусом размытия (0, 2, 3, 4 пикселя), а радиус размытия второго изображения менялся от 0 до 4-х пикселей. Результат показан на графике (рис. 3.2.9). Видно, что при обработке пары изображений шумы минимальны, когда радиус размытости обоих изображений совпадает.

Этот факт в дальнейшем принимался во внимание, и, когда проводилась корреляционное сравнение фотографии с модельным бинарным объектом, степень размытости объекта приводилась в приблизительное соответствие качеству фотографии для улучшения стабильности измерений.

На реальных изображениях всегда присутствует шум – случайный аддитивный сигнал. Очевидно, что зашумленность изображений негативно сказывается на точности определения положения максимума корреляционной функции. Для исследования влияния шума были проведены тесты, в которых использованы пары модельных изображений, одно из которых соответствовало несмещенной “поверхности”, а второе отражало смещение “поверхности” на 1 пиксель. В первом варианте теста, для строго бинарных изображений, шум моделировался как случайно распределенные по всему полю исследуемого изображения точки с инвертированным значением сигнала. То есть некоторый процент случайных пикселей изображения из белых превращался в черные и наоборот, имитируя дефекты приемной матрицы (битые пиксели). Результат измерения статистической погрешности в зависимости от доли бинарного шума в изображении показан на рис.3.2.10.

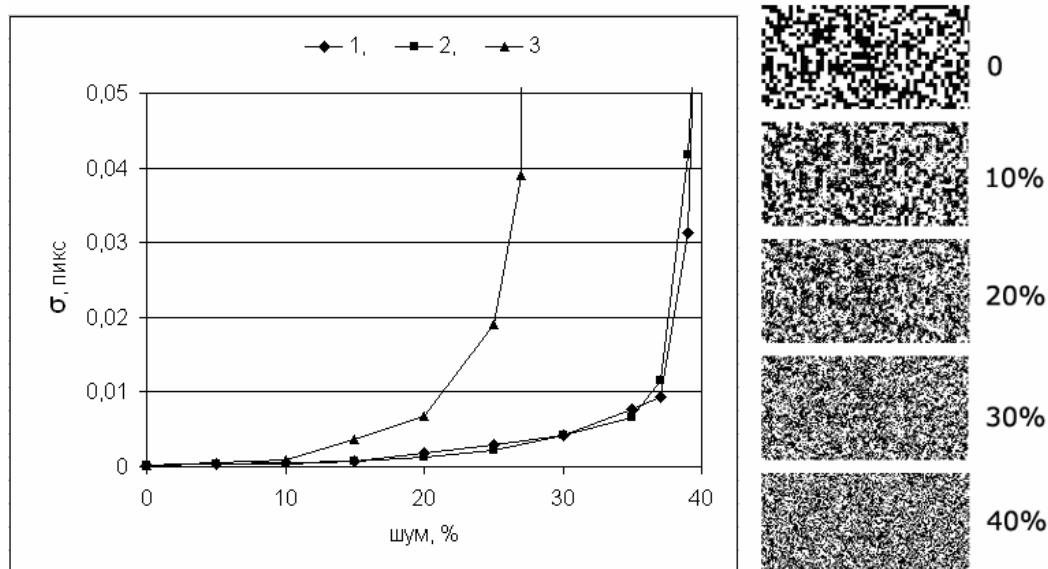


Рис.3.2.10. Зависимость статистической ошибки от количества случайно инвертированных пикселей для бинарных картин. Кривые 1 и 2 соответствуют добавлению шума в одно из изображений, кривая 3 – зашумлены оба изображения из пары. Справа показаны фрагменты изображений при разной степени зашумленности.

С увеличением количества «испорченных» пикселей статистическая погрешность корреляционных измерений плавно растет. По достижении критического уровня зашумленности (около 35% площади изображения в случае, когда зашумленное изображение сравнивается с эталонным и около 25% при обработке двух изображений с одинаковым уровнем шума) ошибка резко возрастает, и, при увеличении доли случайного аддитивного сигнала в изображении до ~40% и ~30% соответственно, корреляция исчезает.

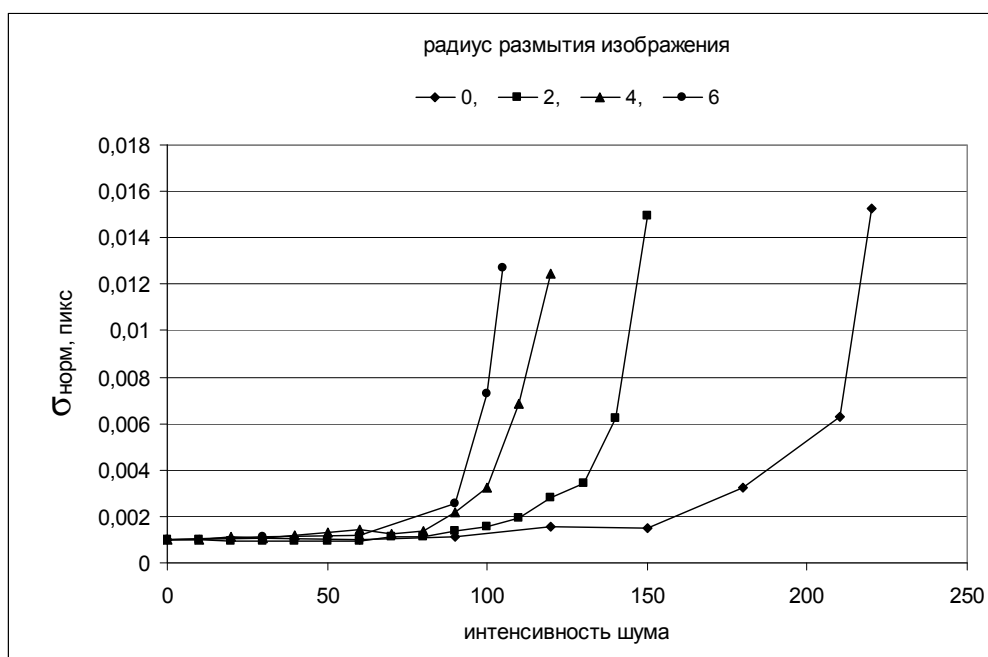


Рис.3.2.11. Зависимость приведенного среднеквадратичного отклонения измерения корреляционного сдвига от интенсивности гауссового шума для изображений с различной степенью размытия.

Для исследования влияния уровня шума на обработку реальных, полутоновых изображений, на одно из пары идентичных монохромных изображений, сдвинутых друг относительно друга на 1 пиксель, накладывался случайный сигнал с гауссовой статистикой и возрастающей интенсивностью (рис.3.2.11). Гауссов шум с максимальной амплитудой до 50 – 60 единиц (около 1/5 от динамического диапазона изображения 0 – 255) практически не сказывается на среднеквадратичном отклонении корреляционных измерений. При дальнейшем росте интенсивности шума статистическая погрешность растет, и затем корреляция теряется. Критическая интенсивность шумового сигнала различна для изображений с разным радиусом размытия. Наиболее устойчивы к шуму бинарные изображения, даже при максимальной интенсивности аддитивного гауссового сигнала 200 единиц (4/5 от интенсивности изображения) корреляционный сдвиг измеряется достаточно стабильно. Для сильно размытых изображений порог нахождения корреляции примерно в два раза ниже.

К вариациям общей яркости изображений корреляционный метод не чувствителен. Понижение контраста изображений не сказывается на точности определения положения пика корреляции. Стабильность измерений при понижении контраста также практически не изменяется. При понижении контраста одного из изображений в сто раз среднеквадратичное отклонение увеличивается на 4%. Для бинарных изображений алгоритм нахождения положения максимума пика корреляции работает устойчиво вплоть

до минимальной (1 из 255) разницы между двумя уровнями интенсивности. На рис.3.2.12 приведена зависимость среднеквадратичного отклонения корреляционного определения сдвига от степени контрастности одного из пары обрабатываемых изображений.

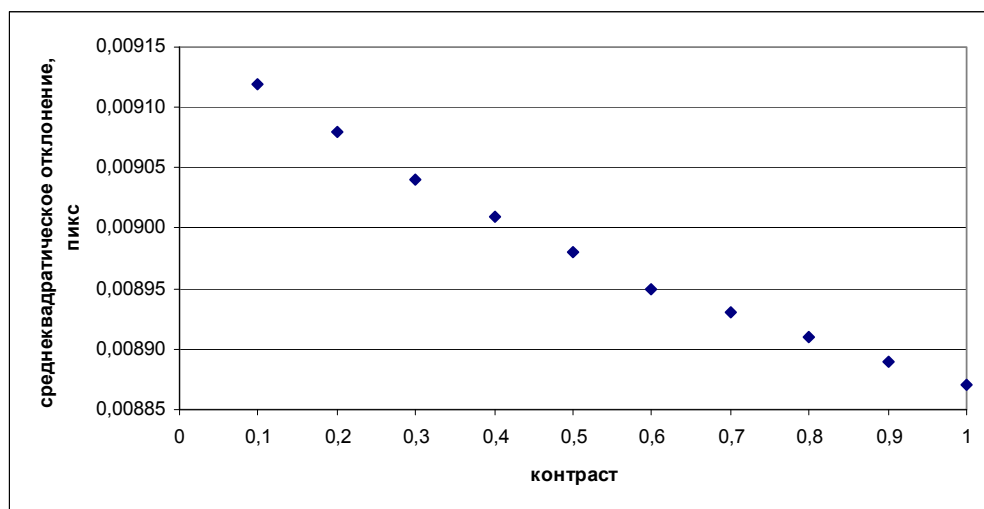


Рис.3.2.12. Зависимость среднеквадратичного отклонения корреляционного определения сдвига от степени контрастности изображения для случайных бинарных картин. Размер элементов 6х6 пикс. Размер окна 32х32, усреднение проводилось по 10000 измерениям. Контраст, равный 1, соответствует интенсивности черных и белых элементов соответственно 0 и 255. На систематическую ошибку степень контраста не влияет.

Корреляционная функция не инвариантна относительно масштаба. Но довольно часто приходится рассчитывать корреляцию между изображениями, масштаб которых различен, например, из-за ракурса съемки. Изображение также может искажаться из-за aberrаций оптической системы, особенно на краях поля зрения. Тогда масштаб изменяется по-разному в перпендикулярных направлениях, изображение искажается, вытягивается. Но в некотором диапазоне масштаба корреляционный метод все-таки вполне применим. На рис. 3.2.13 показана зависимость среднеквадратичного отклонения при корреляционных измерениях от изменения масштаба одного из изображений. Масштаб изменялся по одной координате, одна из картин сплющивалась и растягивалась по вертикали. Поскольку при этом только центральная горизонтальная полоса изображения остается несмещенной, усреднение измерений проводилось по ней. Видно, что корреляционные измерения дают достаточно устойчивый результат в довольно широком диапазоне искажений, до 10-15%.

Точность корреляционных измерений зависит не только от свойств изображений, по которым проводятся вычисления, но и от параметров самой корреляционной

обработки. Например, нужно тщательно выбирать размер окна корреляции, а также соотношение его сторон. Увеличение окна корреляции по любой из координат приводит к более точному значению сдвига, но при этом теряется локальность измерений по этой координате. Для каждой конкретной задачи должен быть свой оптимальный выбор.

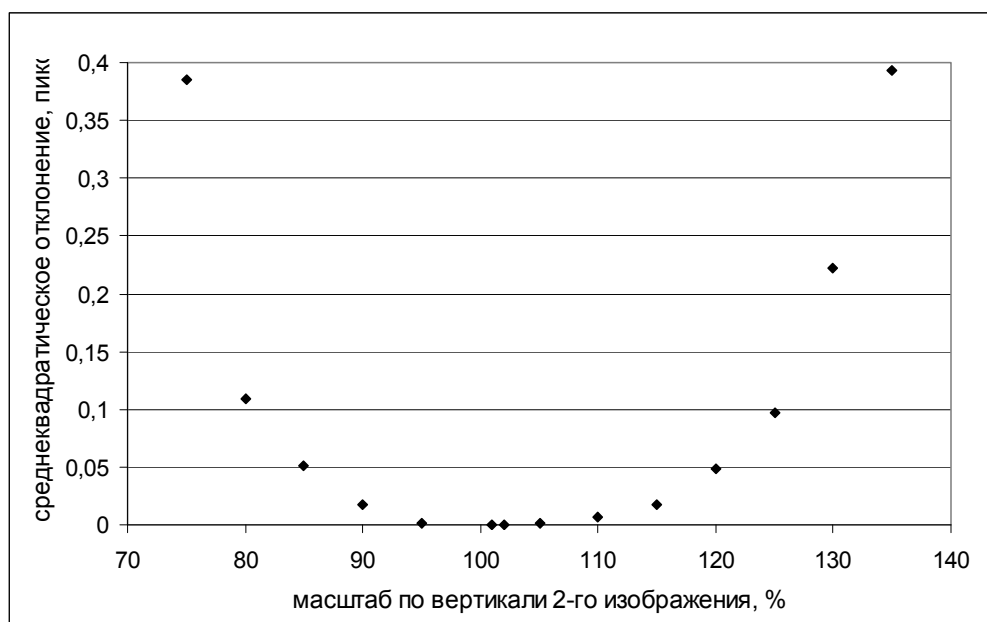


Рис.3.2.13. Зависимость среднеквадратичного отклонения корреляционного определения сдвига от вертикального масштаба одного из изображений относительно другого. Размер элементов в неискаженной картине 6x6 пикс. Размер окна 32x32, усреднение проводилось по измерениям в центральной, несмещенной области изображений (размер 500x4 пикс.).

Например, при исследовании диффузии двух жидкостей с горизонтальной границей между ними, градиент показателя преломления направлен вертикально, и удобнее выбирать окно для корреляционной обработки, максимально растянутое по горизонтали для достижения большей точности и устойчивости работы алгоритма. По вертикали же размер лучше выбрать минимальный для более детальной проработки градиента показателя преломления. Кроме того, при выборе размера окна необходимо учитывать масштаб неоднородностей изображения, то есть ширину функции автокорреляции для обрабатываемой области. Очевидно, что чем больше информационных элементов (в случае спекл-структуры - пятен спеклов) попадает в окно обработки, тем точнее будет результат измерений. На рис. 3.2.14 приведена зависимость ошибки корреляционного определения сдвига и среднеквадратичного отклонения от размера окна при фиксированном размере элементов изображения (2x2 пикс) и

фиксированном заданном сдвиге искусственной спекл-структуры. Систематическая ошибка измерений при увеличении размера окна асимптотически стремится к нулю, и значительно уменьшается среднеквадратичное отклонение (на рисунке показано в логарифмическом масштабе).

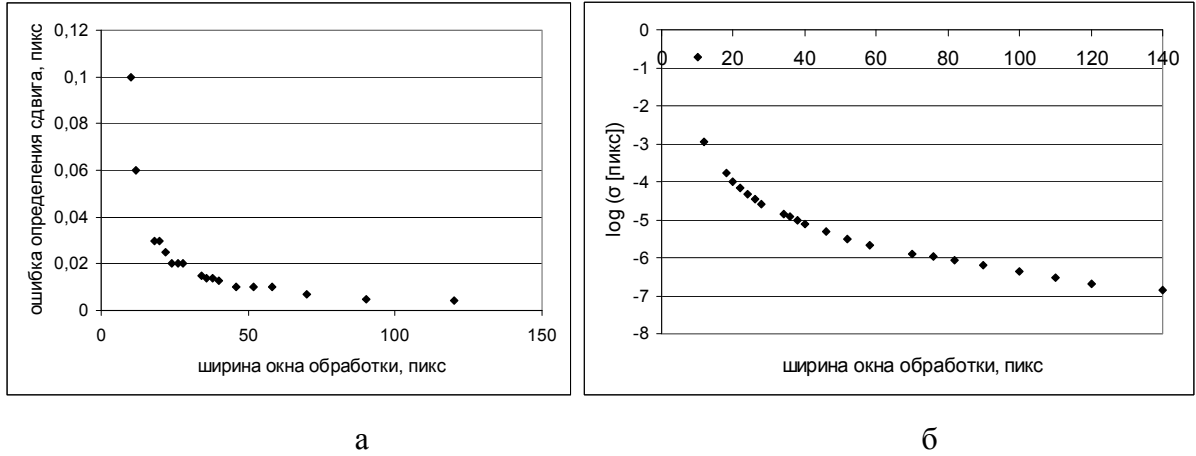


Рис. 3.2.14. Зависимость ошибки корреляционного определения сдвига (а) и логарифма среднеквадратичного отклонения (б) от размера окна. Размер элементов изображения 2х2 пикс, заданное смещение 3 пикс, усреднение проводилось по 2500 измерениям.

Механизм возникновения систематической ошибки при цифровой записи и дальнейшей цифровой корреляционной обработке лазерных спекл-картин рассмотрен подробно в [12]. Аналогичное рассмотрение можно провести и для регистрации искусственных спекл-структур в белом свете. В соответствии с теорией дискретизации [94], цифровое изображение можно рассматривать как результат свертки исходного изображения $I_1(x, y)$ с функцией чувствительности каждого сенсора приемной матрицы $P(x, y)$ (будем считать ее симметричной) и последующей дискретизации этой свертки решеткой δ -функций, расположенных в центре каждого сенсора

$$I_d(x, y) = [I_1(x, y) * P(x, y)] \sum_{j_1} \sum_{j_2} \delta(x - j_1 \Delta x, y - j_2 \Delta y), \quad (3.2.7)$$

где Δx и Δy - периоды матрицы сенсоров в направлении соответствующих осей. Спектральную плотность мощности цифрового изображения получаем как фурье-образ автокорреляции (3.2.7)

$$F_d(v_x, v_y) = |F[I_1(x, y)]|^2 |F[P(x, y)]|^2 * \sum_{j_1} \sum_{j_2} \delta(v_x - j_1 / \Delta x, v_y - j_2 / \Delta y). \quad (3.2.8)$$

Первый множитель в (3.2.8) – это пространственный спектр исходного изображения, а второй – фурье-образ автокорреляции профиля чувствительности сенсора. Если считать сенсор квадратом со стороной a , то второй множитель в уравнении (3.2.8) примет вид $\text{sinc}^2(av_x)\text{sinc}^2(av_y)$. Таким образом, спектральная плотность мощности цифрового изображения состоит из модулированной спектральной плотности исходного изображения, реплицированной в области пространственных частот с частотой дискретизации $(1/\Delta x, 1/\Delta y)$. Если пространственный спектр исходного изображения ограничен по частотам, так что $F_{11}(v_x, v_y) = 0$ при $|v_x| > 1/2\Delta x$ и $|v_y| > 1/2\Delta y$, отдельные спектры в (3.2.8) не перекрываются. Если на цифровую матрицу регистрируется лазерная спекл-картина, то это условие (критерий Найквиста) будет

$$\max|\Delta x, \Delta y| \leq 0,41b_s, \quad (3.2.9)$$

где b_s – размер спекла (см. (1.1)). Если критерий Найквиста не выполняется, то в спектре пространственных частот возникают паразитные компоненты, которые приводят в результате к систематической ошибке при корреляционных вычислениях – ошибке вследствие шумов дискретизации (aliasing error). В случае, когда корреляционным методом обрабатываются изображения, в которых границы элементов резкие, без значительного размытия, в спектре изображения появляются высокие пространственные частоты, которые при корреляционных расчетах приводят к систематической ошибке измерений. Размер элементов картины также влияет на результат, но в меньшей степени. На рис.3.2.15 показаны зависимости ошибки вследствие шумов дискретизации при обработке двух изображений, содержащих по одному информационному элементу (точке) с различными характеристиками. Рис.3.2.15 (а) показывает зависимость ошибки от размера элемента изображения при резких его краях. С увеличением размера элемента ошибка уменьшается, но незначительно, оставаясь на уровне ~ 0.1 пикселя. При увеличении радиуса размытия систематическая ошибка заметно падает, от 0,1 пикселя при четких краях, до 0,01 пикселя для радиуса размытия 3 пикс. Эта зависимость представлена на рис.3.2.15 (б) для точки размером 5х5. Измерения выполнены при модельных сдвигах с шагом 0.1 пикселя при билинейной интерполяции. Применение бикубической интерполяции в модельных экспериментах не влияет на характерную величину ошибки, но немного изменяет форму ее зависимости от сдвига. Сравнение поведения систематической ошибки для случаев билинейной и бикубической интерполяции показано на рис. 3.2.16. Данные приведены для элемента 5х5 пикселей с резкими границами. Нужно отметить, что зависимости на рис.3.2.15 и 3.2.16 получены без учета статистических эффектов, то есть не для случайных картин, реальных ли или модельных, а для одного

элемента (пятна). Величина ошибки при этом не зависит от размера окна корреляционной обработки. Это – ошибка вследствие шумов дискретизации (aliasing error) в чистом виде.

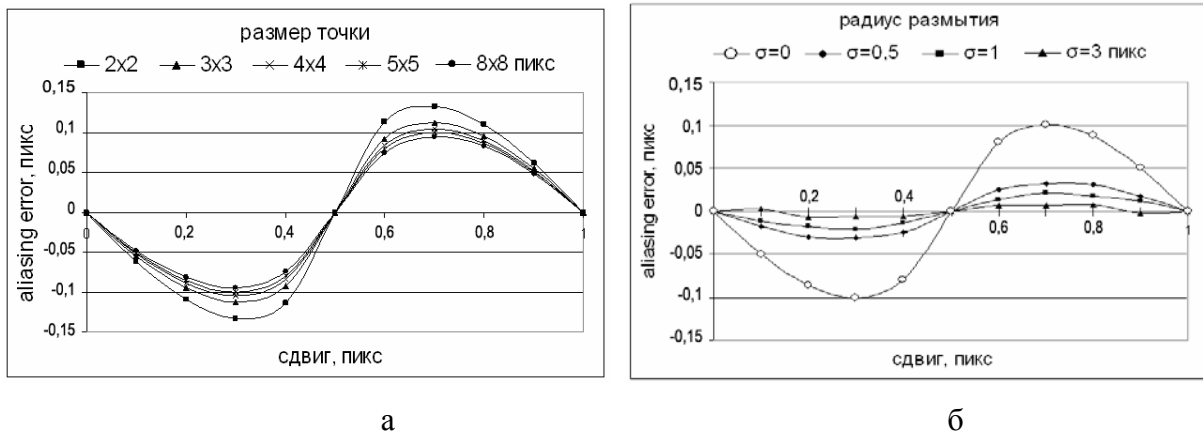


Рис.3.2.15. Зависимость систематической ошибки измерений от сдвига. Элемент, по которому рассчитывалась корреляция - квадрат с резкими краями (а) и квадрат 5x5 пикселей с радиусом размытия 0, 0.5, 1.0, 3.0 пикселя (б).

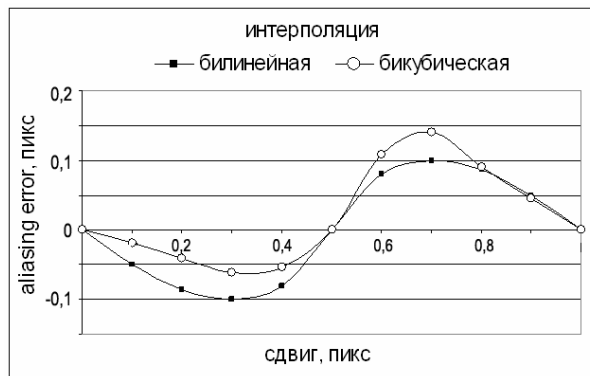


Рис.3.2.16. Сравнение корреляционного расчета для сдвигов модельного объекта при билинейной и бикубической интерполяции.

При переходе к реальным (а также модельным) цифровым изображениям ошибка из-за дискретизации изменяется довольно сложным образом в зависимости от параметров изображения. На рис.3.2.17 показано поведение систематической ошибки в зависимости от размера элементов искусственной спекл-картины. Данные приведены для расчетов корреляционных сдвигов изображений с резкими краями элементов по окну 32x32 пикселя. Видно, что характер поведения и величина ошибки зависят от размера окна корреляции довольно слабо и напоминают зависимость ошибки от размера элемента для одного элемента (рис.3.2.15(а)). При изменении размера окна обработки, характер поведения ошибки сохраняется, а величина изменяется довольно слабо. Но это справедливо только для изображений с резкими краями элементов. При расчетах для реальных изображений ошибка существенно изменяется в зависимости как от размера окна корреляции, так и от радиуса размытия обрабатываемых изображений. Характер

поведения систематической ошибки показан на рис. 3.2.18 для двух вариантов размера окна обработки – 64х64 пикселя (а) и 32х32 пикселя (б), а также для различных радиусов размытия изображений. Борьбе с ошибками такого рода посвящено множество работ за последние годы, например, [12, 13, 34, 36, 95, 96], особенно в связи с бурным развитием объемного компьютерного зрения и 3d корреляционных методов [97]. Алгоритмы, используемые для уменьшения влияния ошибок, в большинстве случаев итерационные, зависят от конкретной задачи.

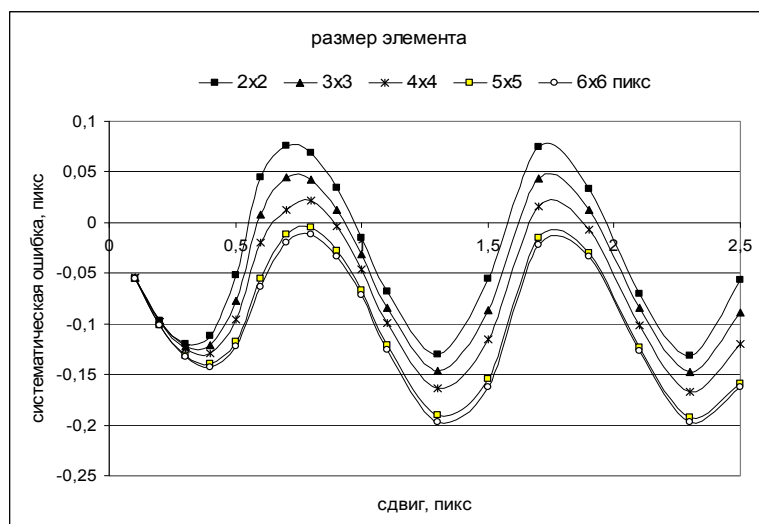
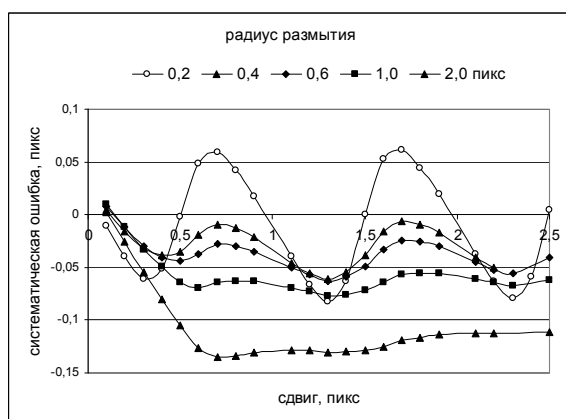
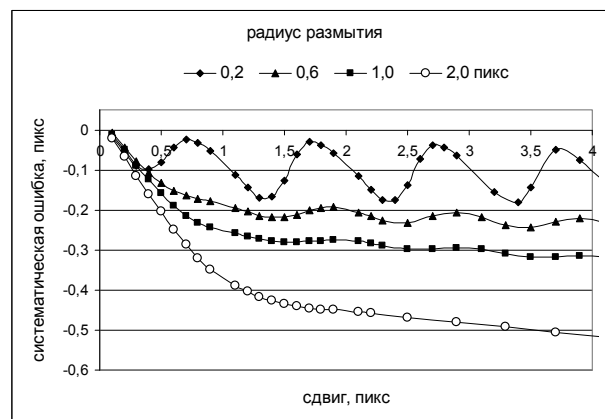


Рис.3.2.17. Зависимость систематической ошибки от сдвига при вычислении корреляции между модельными изображениями с резкими краями элементов.



а



б

Рис.3.2.18. Зависимость систематической ошибки от сдвига при вычислении корреляции между модельными изображениями при разных радиусах размытия. Размер элементов 6х6 пикс. (а) - размер окна 64х64, усреднение по 100 измерениям, (б) - размер окна 32х32, усреднение по 10000 измерений.

Кроме систематической ошибки, связанной с дискретностью расчетов, на точность корреляционных измерений влияет случайная ошибка, величина которой, как было показано выше, также зависит от таких параметров изображения, как размер элемента и радиус размытия. Но зависимость эта противоположная - при увеличении размера элементов изображения и радиуса их размытия статистическая ошибка возрастает.

При фиксированном размере окна корреляционной обработки величина среднеквадратичного отклонения линейно зависит от площади элемента спекл-структуры (при росте площади информационных элементов всё меньшее их число попадает в рабочее окно). Для цифровых изображений реальных лазерных спекл-картин также отмечалась линейная зависимость величины случайных ошибок корреляционной обработки от размера пятен [11, 12]. На рис.3.2.19 приведена зависимость среднеквадратичного отклонения корреляционных измерений от сдвига модельного изображения при разных размерах элементов изображений. Во всех сериях измерялся и усреднялся по 10000 точек заданный трансляционный сдвиг случайной бинарной картины, от 0,1 до 2,5 пикселей. Измерения проводились окном 32x32 пикселя. Линиями показаны зависимости ошибок от сдвига для обработки картин с размеров элементов 1x1, 2x2, 3x3, 4x4, 5x5 и 6x6 пикселей.

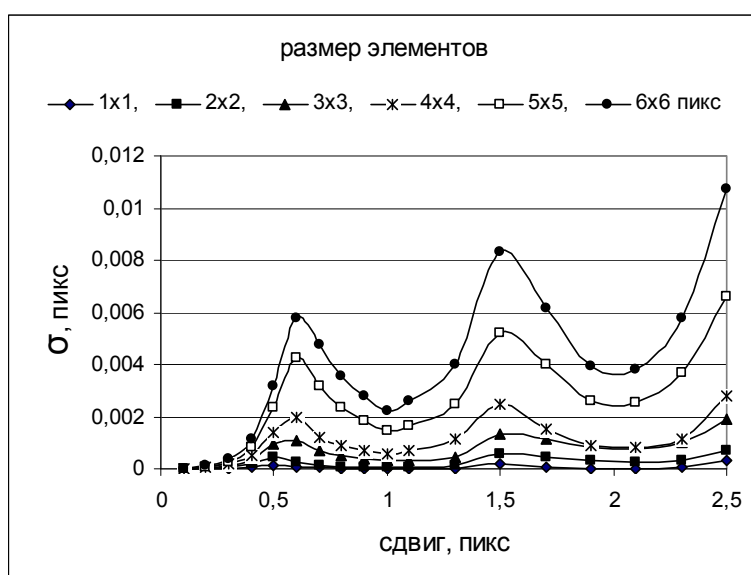


Рис.3.2.19. Зависимость среднеквадратичного отклонения корреляционного определения сдвига от величины сдвига для случайных бинарных картин с различным размером элементов. Размер окна 32x32, усреднение проводилось по 10000 измерениям.

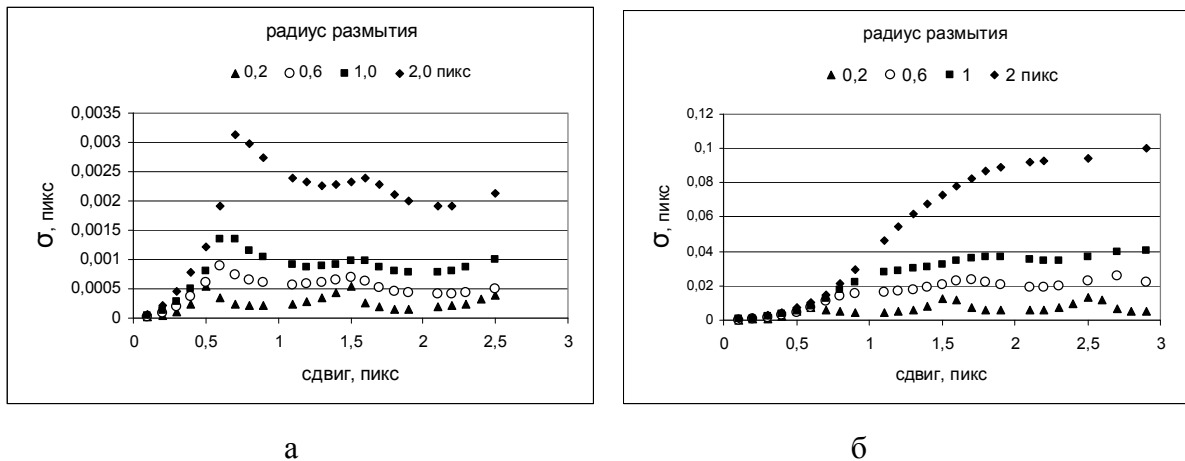


Рис. 3.2.20. Зависимость среднеквадратичного отклонения корреляционного определения сдвига от величины сдвига для случайных бинарных картин с различным радиусом размытия (0.2, 0.6, 1, 2 пикс). Размер элементов 6x6 пикс. (а) - размер окна 64x64, усреднение по 100 измерениям, (б) - размер окна 32x32, усреднение по 10000 измерений.

Среднеквадратичное отклонение растет не только с увеличением размеров искусственных спекл-пятен, но и с увеличением их радиуса размытия, который, в отличие от изображений реальных спекл-картин, можно варьировать. Иллюстрация того, как ведет себя среднеквадратичное отклонение при корреляционных измерениях в зависимости от радиуса размытия изображений, показана на рис. 3.2.20. Две диаграммы отличаются размером окна корреляционной обработки, данные (а) получены при корреляционной обработке окном 64x64 пикселя, данные (б) – 32x32. Видно, что зависимость величины среднеквадратичного отклонения от радиуса размытия линейная, как и от размера элементов изображения. При уменьшении стороны окна обработки в два раза точность измерений упала на три порядка. Видно, что для таких параметров изображения (размер элементов 6x6 пикселей, радиус размытия 2 пикселя) размер окна 32x32 находится на грани допустимого. Можно, естественно, выбирать размер окна любой промежуточный по обеим осям, чтобы делать оптимальный выбор между точностью измерений и их локальностью. Тогда для работы алгоритма быстрого фурье-преобразования производится дополнение окна до размеров 2^n по каждой координате точками со средней по изображению интенсивности.

В качестве заключения к разделу приведем некоторые 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 $p = 0.5$.

Размер информационного элемента изображения (спекла) должен быть не меньше 2 пикселей приемной матрицы.

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.

3.3. Применение корреляционного метода для измерения градиентов оптической длины.

Рассмотрим несколько примеров применения корреляционного метода. Один из вариантов – визуализация и измерение неоднородностей показателя преломления в прозрачных средах. Было проведено несколько серий измерений градиентов оптической длины в пламени.

Схема фотографирования показана на рис.3.3.1. В плоскости $\xi\eta$ находится плоская случайная картина, играющая роль фонового изображения. Плоскость xu – плоскость регистрации, в ней расположена приемная матрица камеры. **OS** – оптическая система с фокусным расстоянием f , формирующая изображение, **Ob** – плоскость, в окрестности которой расположен исследуемый объект. Метод чувствителен к компонентам градиента показателя преломления объекта, перпендикулярным лучу зрения. Отклонение луча $\Delta\theta$, вызванное прохождением его через среду, содержащую неоднородности, приводит к смещению в плоскости приемной матрицы изображения соответствующего участка случайной картины на Δx . В предположении, что угол α мал, а объект можно считать локализованным в плоскости **Ob**, по смещению Δx можно из геометрии схемы рассчитать угол $\Delta\theta$

$$\Delta\theta \approx \Delta x \frac{L-f}{lf} \cos^2 \beta \quad (3.3.1)$$

Угол β обычно мал, и в большинстве случаев множитель $\cos^2 \beta$ стремится к единице и может быть опущен.

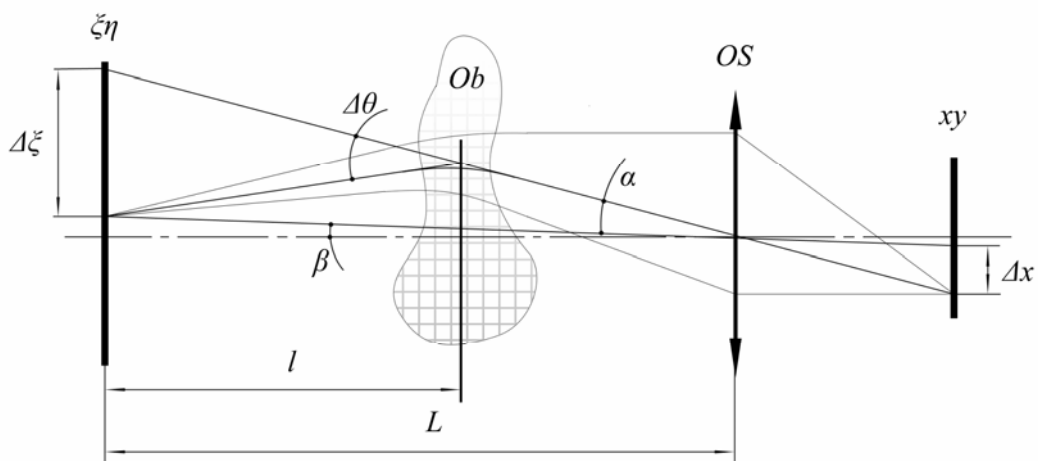


Рис. 3.3.1. Схема регистрации неоднородностей прозрачного объекта.

В эксперименте расстояние L от объектива до экрана составляло 1 м. Между экраном и фотоаппаратом располагался прозрачный исследуемый объект (в данном случае пламя спиртовки). Расстояние от экрана до пламени l в разных сериях было 5 см (вблизи экрана), 50 см (посередине) и 85 см (возле фотоаппарата). Размер матрицы 5 МПкс. Обработывалась, как правило, часть изображения, 5-10 на 10-20 сантиметров. В качестве объекта использовался черно-белый узор на регулярной сетке с квадратными ячейками со случайным распределением зачернения ячеек. Площадь изображения ячейки составляла 7 – 10 пикселей матрицы фотоаппарата.

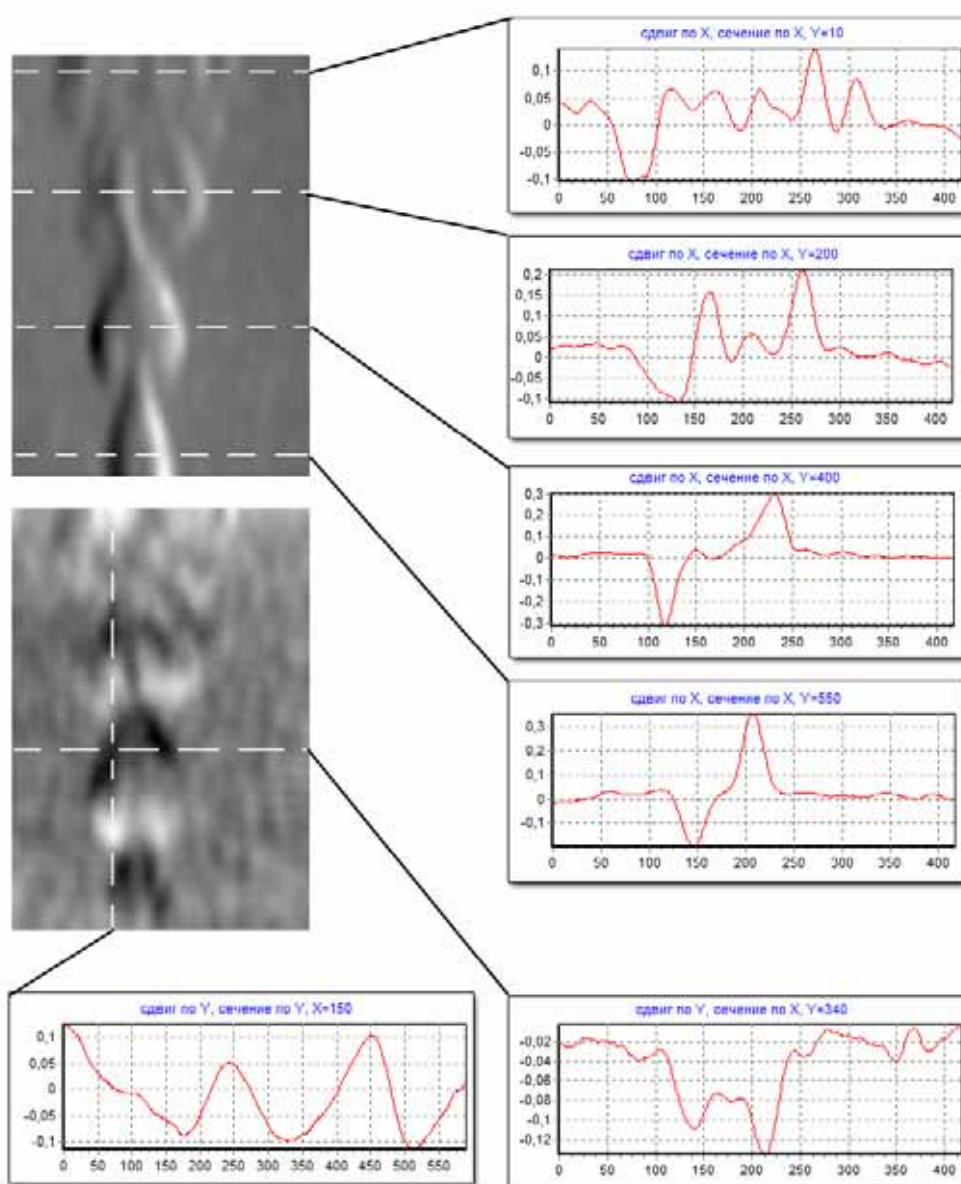


Рис.3.3.2. Общий вид распределения сдвигов по оси абсцисс (вверху) и оси ординат (внизу) для двух фотографий и характерные их сечения. Светлые области соответствуют положительным сдвигам, темные – отрицательным. По обеим осям графиков – пиксели матрицы фотоаппарата.

Результат обработки одной из пар фотографий приведен на рис.3.3.2. Спиртовка располагалась в 5 см от экрана. При такой геометрии регистрации максимальный сдвиг изображения фоновой структуры, к которому приводит отклонение лучей в пламени, не больше 0,3 пикселя (при приближении пламени к объективу эта величина достигала 3-х пикселей). Данная пара фотографий выбрана для иллюстративности. В объектив попала не только область самого пламени, но и значительная часть вихревого движения горячего воздуха. Вверху приведена картина распределения горизонтальной составляющей смещения. Серый фон соответствует нулевому значению компоненты. Темные области соответствуют сдвигу в отрицательном направлении оси абсцисс, светлые – в положительном.

В нижней части картинки четко видно пламя спиртовки (сужающаяся часть в нижней четверти картины и далее вихревые образования). Внизу приведена картина распределения вертикальной составляющей сдвига. Также видны область пламени и вихревых структур с тем же внешним контуром, но другим характером рисунка. По графикам можно оценить, что точность определения сдвига составляет существенно менее 0.1 пикселя. Видно, что по мере опускания к пламени и вхождения в область пламени, величина градиента оптической толщины в среднем возрастает. Чувствительность метода зависит от величины фокусного расстояния фотоаппарата на этапе регистрации изображений, от геометрии регистрации, а также от размера элементов матрицы фотоаппарата. Следует отметить, что диаметр входного отверстия объектива около 35 мм. В рассмотренном выше примере апертура пучка, образующего изображение одного пикселя приемной матрицы фотоаппарата, составляет около 1.7 мм, так что полученная картина распределения достаточно локальна. Однако вследствие близости к объекту при заданном значении минимально измеримого смещения картины величина угла отклонения составляет 4.5×10^{-5} . По мере удаления от экрана до 85 см эта величина возрастает до 2.6×10^{-6} . При этом апертура пучка для одного пикселя возрастает до 27 мм, и величина градиента становится нелокальной характеристикой.

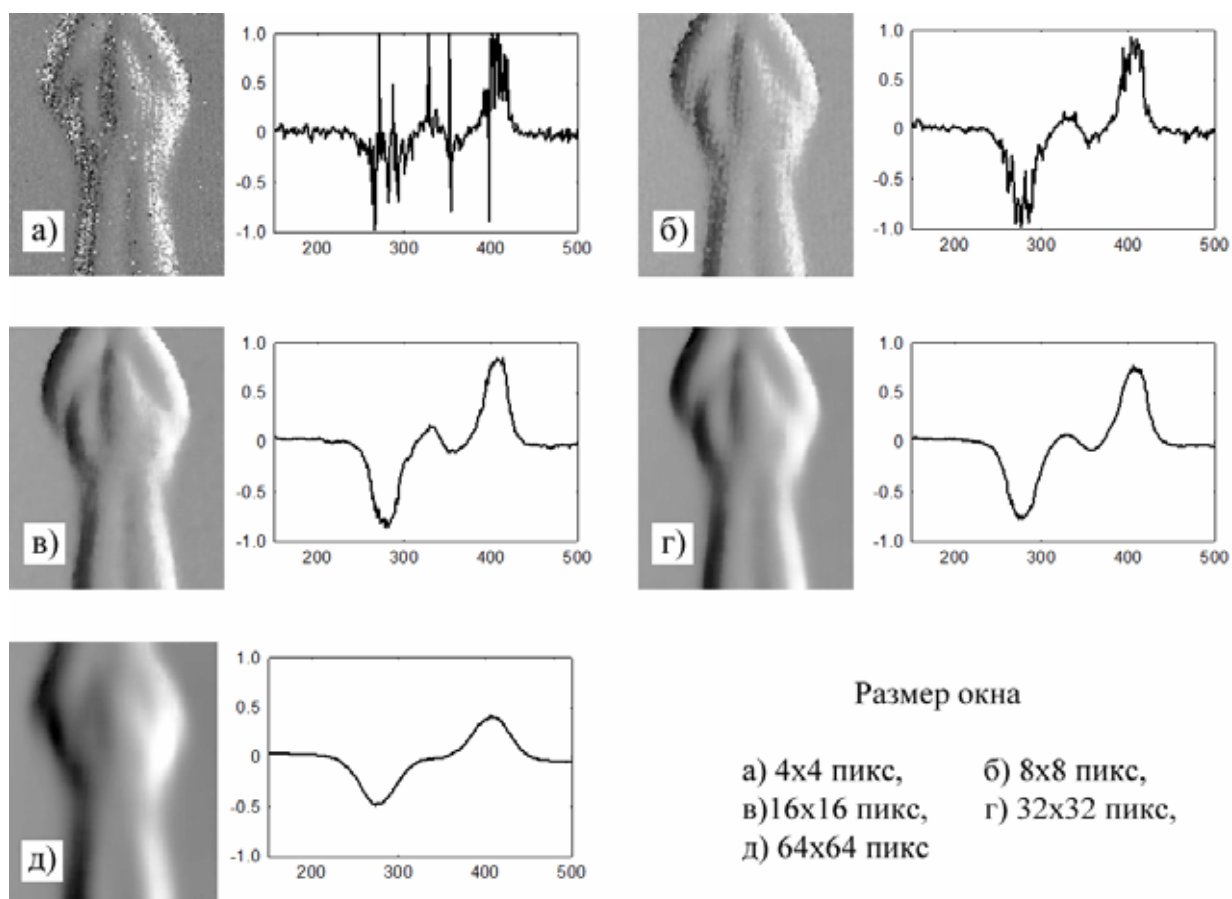


Рис.3.3.3. Карты горизонтальных сдвигов и их сечения, проведенные через одну и ту же точку. Результаты получены при обработке одной и той же пары фотографий окнами разного размера.

Качество получаемой картины и точность измерений зависят также от параметров вычисления корреляционной функции, например, от размеров окна интегрирования. На рис.3.3.3 показаны результаты сканирования пары фотографий окнами разного размера. Изображения – это карты горизонтальных сдвигов фоновой структуры, полученные при обработке одной и той же пары фотографий окнами разного размера. Так же, как и на рис.3.3.2, серый фон соответствует нулевому значению компоненты, интенсивность темных и светлых точек соответствует величине отрицательных и положительных сдвигов. Рядом с изображениями показаны проведенные через одну и ту же точку сечения карт горизонтального сдвига.

Видно, что, чем меньше окно интегрирования, тем сильнее возрастает зашумленность картины. Но, поскольку по окну происходит усреднение, то при увеличении его теряется локальность.

Необходимо также отметить один нюанс получения карт распределения сдвигов по площади изображения. При регистрации последовательности изображений между ними

возможны сдвиги на единицы пикселей или изменение ракурса на доли угловой секунды. Причиной может быть чуть изменившаяся фокусировка объектива или конечная жесткость сборки оптической схемы. Явление постепенного «сползания» изображения (~1 пиксель за ~3-5 минут) отмечается также при киносъемке зафиксированным аппаратом. В таких случаях, чтобы измеряемый сигнал не терялся на фоне общего постоянного или линейного сдвига двух изображений, проводится приведение двух снимков друг к другу. Это делается путем корреляционного совмещения реперных областей кадра (обычно угловых), не содержащих информации об исследуемом процессе. Пояснение процедуры дано в параграфе 4.2, см. также рис.4.3. При необходимости такая коррекция проделывается при всех корреляционных измерениях, и в дальнейшем это не оговаривается.

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

3.4. Применение корреляционного метода для анализа деформаций в прозрачных материалах.

В данной главе предложена схема визуализации упругих напряжений в прозрачных материалах (оргстекло) по изменению оптического пути. Градиент оптического пути измерялся с помощью корреляционного метода. Модельный эксперимент проводился при различных конфигурациях поперечной статической нагрузки балки из оргстекла. Было показано, что сечение поля смещений фоновой структуры соответствует эпюрам напряжений при данной схеме нагрузки балки. Для процесса точечного нагрева кварцевого стекла было проведено сравнение корреляционного метода с методом, основанным на эффекте фотоупругости.

Обычная схема визуализации напряжений на основе эффекта фотоупругости включает в себя два скрещенных поляроида, между которыми помещается исследуемый образец. Эффект зависит от величины двух компонент тензора показателя преломления, приведенного к диагональному виду, и проявляется только при довольно существенных нагрузках. С другой стороны, величина оптического пути в оргстекле при небольших нагрузках изменяется довольно заметно из-за большой величины коэффициента Пуассона для оргстекла. Поэтому представляется естественным провести измерения с помощью корреляционного метода [46, 65].

В качестве цифровых изображений для корреляционной обработки брались кадры из киносъемки, с масштабом около 250 пикселей на сантиметр изображения в плоскости исследуемого объекта. Использовался фотоаппарат Olympus μ Tough. Первый пробный эксперимент проводился при локализованной, но не дозированной нагрузке. Балка из оргстекла сечением 5x5 мм одним концом была зажата в тисках, другой конец свободный. Нагрузка прилагалась вертикально вверх и вниз, точка приложения нагрузки смещалась вдоль балки с шагом 1 см. По фотографиям фоновой картины, сделанным сквозь балку, измерялся сдвиг фонового изображения при нагрузке по сравнению со свободным состоянием балки. Сканирование вдоль балки проводилось окном 32x32 пикселя примерно по центральной части изображения балки, так, чтобы изображение ее границ в расчетах не участвовало.

На рис.3.4.1 показаны три состояния балки. Правый конец закреплен, левый – свободный. Первая фотография – ненагруженная балка, вторая – нагруженная сверху, третья – снизу. Внизу показаны графики измеренных смещений структуры фона. По оси абсцисс – координата вдоль балки в пикселях изображения, по оси ординат – величина вертикального смещения в пикселях. Стрелки указывают места приложения нагрузки.

Видно, что место приложения нагрузки отслеживается довольно четко, а структура фона сдвигается в направлении, противоположном прилагаемой нагрузке.

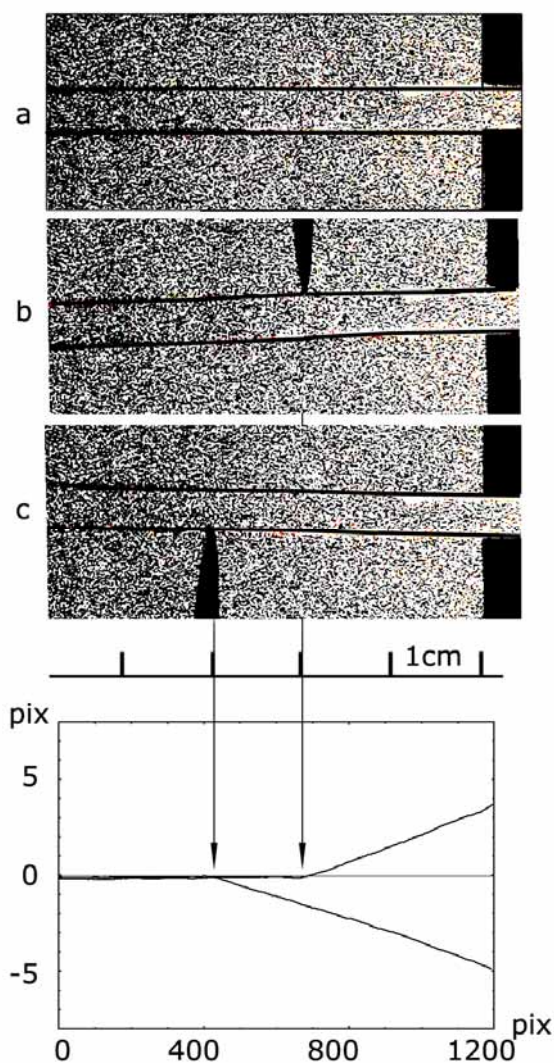


Рис.3.4.1. Локализованная нагрузка балки: (а) – ненагруженная балка, (б) – нагруженная сверху, (в) – снизу. Внизу графики смещений структуры фона. По оси абсцисс – координата вдоль балки в пикселях изображения, по оси ординат – величина вертикального смещения структуры фона в пикселях. Стрелки указывают места приложения нагрузки.

Для оценки чувствительности был проведен следующий эксперимент. Таким же образом закрепленная балка нагружалась в 5 см от места закрепления – на нее ставились разновесы от 1 г до 100 г. Сканирование проводилось, как и в предыдущем случае, вдоль балки. Результат представлен на рис.3.4.2. Кривые 1 – 7 соответствуют различным нагрузкам – от одного до ста граммов. Видно, что сдвиг фоновой картины приблизительно пропорционален приложенному весу и, следовательно, напряжениям в балке.

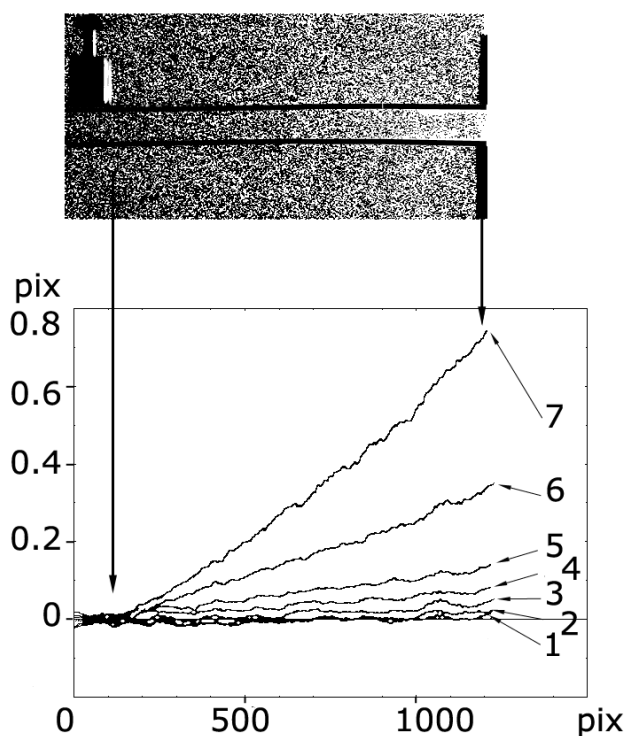


Рис.3.4.2. Дозированная нагрузка балки. Горизонтальная ось – координаты вдоль балки в пикселях, вертикальная ось – вертикальное смещение структуры фона. Кривые 1 – 7 соответствуют различным нагрузкам: 1 – 1 г, 2 – 2 г, 3 – 5 г, 4 – 10 г, 5 – 20 г, 6 – 50 г, 7 – 100 г.

Распределение напряжений в балке – не просто линейная функция координаты, а имеет более сложную форму. Для более наглядной визуализации была взята более широкая полоса из оргстекла (сечение 5x25 мм). На рис.3.4.3 вверху показана схема эксперимента. Балка (1) была закреплена в тисках (3) и нагружалась локально, вертикально вниз (*a*, *b* и *c*). Сравнивались два изображения – в нагруженном состоянии и в ненагруженном. Тем самым не учитывались напряжения, возникающие в пластине при сжатии в тисках. Изображение фоновой структуры в области (2) оставалось неизменным при нагрузке, а в области (1) изменялось в зависимости от приложенной нагрузки. На рис.3 (a), (b), (c) показано векторное представление измеренных сдвигов фоновой структуры по полю пластины при трех вариантах точки приложения нагрузки.

Максимальные величины горизонтальных сдвигов – порядка одного пикселя и в положительном, и в отрицательном направлении. В поле вертикальных сдвигов превалирует направление вверх, максимальные сдвиги в области закрепления детали – до 3-х пикселей. В окрестности точки приложения нагрузки локальный вертикальный сдвиг направлен вниз, величина до одного пикселя.

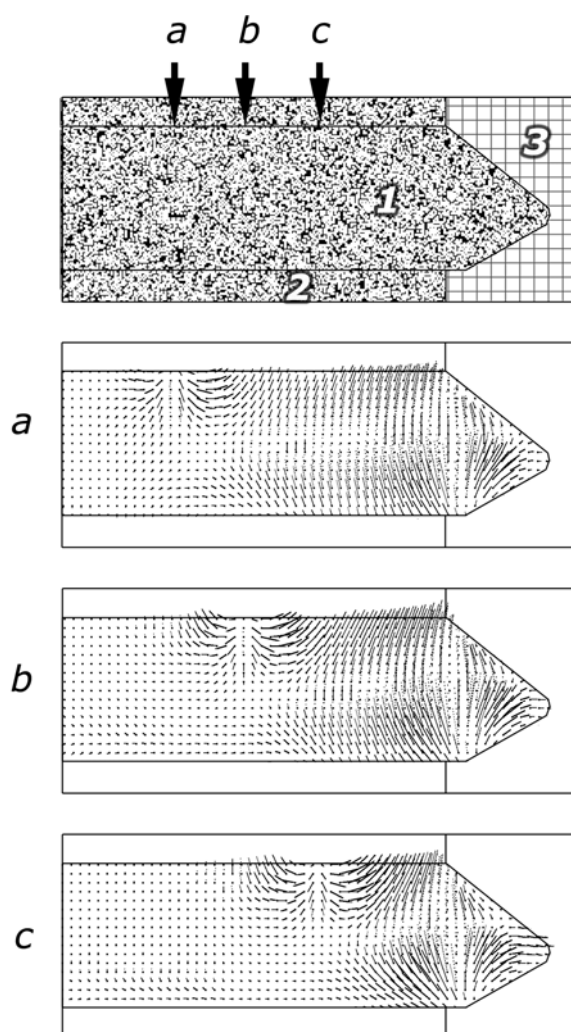


Рис.3.4.3. Вверху – схема нагрузки балки (сечение 5x25 мм). а, b, с – точки приложения нагрузки. (1) – область фоновой картины, снятая сквозь оргстекло, по которой проводились измерения, (2) – оставшаяся неизменной при нагрузке область фоновой картины, (3) – тиски. (а), (b), (с) – векторное представление поля сдвигов фоновой структуры при соответствующих вариантах нагрузки.

Такой удобный способ визуализации напряжений оказывается возможным благодаря сравнительно низкому значению модуля упругости и большой величине коэффициента Пуассона для оргстекла ($E = 0,32 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$, $\mu = 0,35$ [98]), что приводит к заметной трапецевидности поперечного сечения балки при изгибающих нагрузках [99]. Для кварцевого стекла модуль упругости значительно больше, а коэффициент Пуассона в два раза меньше ($E = 7,5 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$, $\mu = 0,17$ [98]), и при такой же геометрии эксперимента (см. рис.3.4.1), но с балкой из кварцевого стекла, максимальный сдвиг фоновой структуры составил 0,3 пикселя (для оргстекла ~5 пикселей).

Для сравнения корреляционного метода визуализации напряжений с методом, основанным на эффекте фотоупругости, были проведены измерения сдвига фоновой

структуры в классическом демонстрационном эксперименте с точечным нагревом стекла. Стекло (толщиной 3 мм и размером $\sim 5 \times 5$ см) помещалось между скрещенными поляроидами и нагревалось в центре острием жала паяльника, площадь контакта $\sim 4 \text{ мм}^2$. В процессе нагрева проявлялась характерная крестообразная структура прошедшего через поляроиды света, принимающая через несколько десятков секунд вид, показанный на рис.3.4.4а. Для корреляционного анализа проводилась съемка такого же процесса нагрева стекла, но без поляроидов, а с искусственной спекл-картиной в качестве фонового изображения. Результат расчетов показан на рис.3.4.4 (b, c, d). Рис 3.4.4.b представляет собой векторное представление поля сдвигов фоновой структуры, окружность показывает размер поляроидов. Рис.3.4.4с и 3.4.4d – горизонтальная и вертикальная компоненты сдвига фоновой структуры. Сдвиги не превышают 0,4 пикселей. Полученная картина сдвигов фоновой структуры соответствует градиентам оптического пути в стекле, возникающим при нагреве и расширении стекла. Отклонения от симметрии как на рис.3.4.4а, так и на рис. 3.4.4b (в правом верхнем секторе эффект более выражен) связаны с тем, что паяльник, острием жала которого производился нагрев, подносился к стеклу не перпендикулярно, а под углом $\sim 30^\circ$, что привело к некоторой асимметрии распределения температуры.

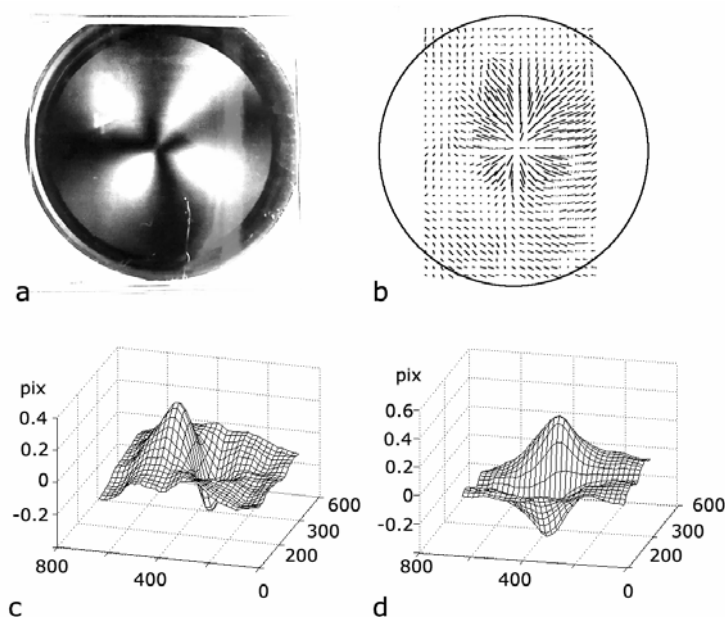


Рис. 3.4.4. а – стекло в скрещенных поляроидах после точечного нагрева в центральной точке, b – векторное представление поля сдвигов фоновой структуры при корреляционной обработке, c – горизонтальная компонента сдвига, d – вертикальная компонента сдвига.

Итак, показано, что корреляционную обработку фоновых изображений можно использовать для визуализации механических и тепловых деформаций прозрачных твердых тел. В частности, при поперечных нагрузках балки сечение поля смещений фоновой структуры соответствует эпюрам напряжений при данной схеме нагрузки. В отличие от метода, основанного на эффекте фотоупругости, корреляционный метод дает информацию о параметрах исследуемого образца, приводящих к изменению оптического пути. Это означает, что для исследований данным методом более удобны материалы с большими величинами коэффициента Пуассона и большими коэффициентами теплового расширения. 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).

4. Применение корреляционной обработки изображений для определения дисторсионных и хроматических искажений фотографических камер и объективов

Все применения корреляционного метода предполагают использование двух изображений для сравнения. Одно – это изображение невозмущенного объекта исследований (без деформаций, изменений плотности или показателя преломления), а другое – изображение с изменениями. Можно в качестве исследуемой прозрачной среды, вносящей неоднородности в изображение, взять саму оптическую систему, строящую это изображение. Это было предложено в [66, 67] и привело к появлению еще одной области для применения корреляционной методики – к исследованию аберраций (в основном, дисторсии) оптических систем.

Идея измерения дисторсионных искажений состоит в следующем. Делается снимок известного случайного плоского бинарного калибровочного объекта. Снимок делается без закрепления фотоаппарата, «с руки». Корреляционным методом находятся 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 можно получить величину и ориентацию смещения любой малой области снимка относительно соответствующей области калибровочного объекта. При обработке скользящим окном можно получить значения смещений в каждой точке снимка, чтобы затем использовать эту матрицу для компенсации искажений снимков, полученных с помощью данной оптической системы.

С помощью похожей процедуры, путем корреляционной обработки пар областей изображения из разных цветовых каналов можно получить величину расхождения цветов, то есть оценить степень хроматических искажений по площади кадра.

Отметим, что в данной работе исследуются только дисторсионные искажения изображения, когда линейное увеличение изменяется по полю кадра. Резкость и другие возможные параметры оценки изображения, связанные с остальными аберрациями (сферическая, астигматизм, кривизна поля и кома), которые проявляются в виде увеличения пятна рассеяния, но не влияют на его положение в кадре, мы не рассматриваем.

4.1. Принцип определения дисторсии оптической системы.

Пусть $R(\vec{r})$ – известное бинарное распределение в плоскости объекта (рис. 4.1.а), а $P(R(\vec{r}))$ – преобразование исходного распределения, включающее в себя сдвиг, изменение

масштаба, поворот и проективное преобразование (рис. 4.1.б). В случае отсутствия дисторсии (модель камеры-обскуры) это и будет распределение почернения в плоскости изображения.

Обозначим через $D(\vec{r})$ матрицу сдвига положений пикселей изображения в результате различного рода искажений (дисторсии, отклонения точки пересечения оптической оси с приемной матрицей от центра матрицы и т.д.). Тогда $D(P(R(\vec{r})))$ – распределение в плоскости изображения с учетом искажений (рис. 4.1.в). Чтобы выделить матрицу искажений D , мы сравниваем полученное в фотоаппарате изображение $D(P(R(\vec{r})))$ с исходным распределением, на которое наложено преобразование $P(R(\vec{r}))$.

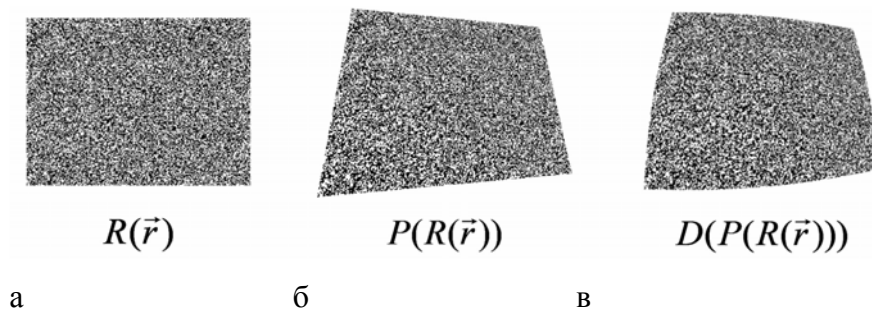


Рис.4.1. (а) – известное бинарное распределение в плоскости объекта, (б) – проективное преобразование исходного распределения: сдвиг, изменение масштаба, поворот и наклон оптической оси (камера-обскура), (в) – распределение в плоскости изображения с учетом искажений

4.2. Нахождение параметров проективного преобразования для приведения калибровочного объекта в соответствие ракурсу съемки

В общем случае преобразование определяется восемью параметрами, из которых 2 отвечают за сдвиг, 1 – за поворот, 1 – за масштаб. Воспользуемся основной теоремой о проективном преобразовании плоскости: каковы бы ни были четыре точки A, B, C, D плоскости Π , из которых никакие три не лежат на одной прямой, и четыре точки A', B', C', D' той же плоскости, из которых никакие три также не лежат на одной прямой, существует и притом только одно проективное преобразование, которое точки A, B, C, D переводит соответственно в точки A', B', C', D' [100]. Таким образом, для полного определения параметров преобразования необходимо и достаточно найти попарное соответствие четырех точек в плоскости объекта и четырех точек в плоскости изображения, причем никакие три точки не должны лежать на одной прямой. Координаты x', y' точки в плоскости изображения связаны с координатами x, y в плоскости объекта дробно-линейными соотношениями:

$$x' = \frac{ax + by + c}{dx + ey + k} \quad y' = \frac{fx + gy + h}{dx + ey + k} \quad (4.1)$$

Параметров в этом преобразовании 9, но только 8 из них независимые: все параметры могут быть умножены на одно и то же число. Таким образом, найдя соответствие между четверками точек, мы знаем закон преобразования координат между плоскостью объекта и плоскостью изображения, т.е. преобразование $P(R(r))$.

4.3. Определение параметров внешнего ориентирования камеры по корреляционному соответствию областей калибровочного объекта и его изображения

Одним из преимуществ обсуждаемого принципа является то, что для определения матрицы дисторсионных смещений точек изображения не требуется знания параметров внешнего ориентирования оптической системы. Но при желании их можно определить в явном виде. После нахождения соответствия координат изображения и объекта можно определить положение центра проекции в системе координат, связанной с объектом, то есть положение камеры и углы наклона ее оптической оси по отношению к плоскости объекта. Эти величины называют параметрами внешнего ориентирования камеры (рис.4.2).

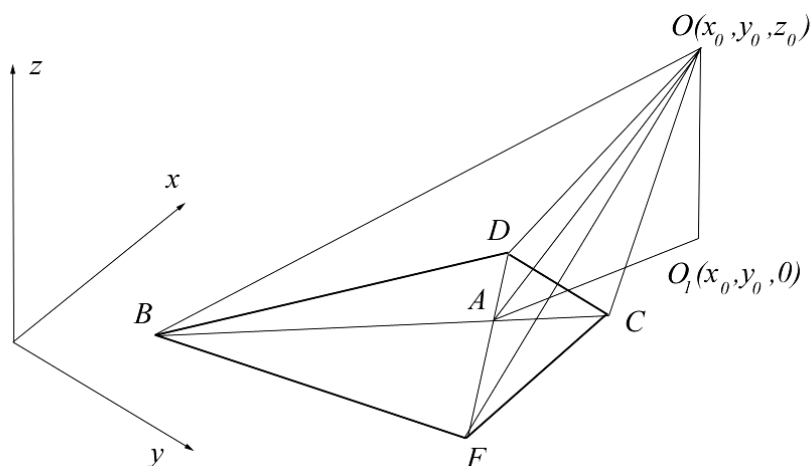


Рис.4.2. Иллюстрация к расчетам параметров внешнего ориентирования камеры. Точка $O(x_0, y_0, z_0)$ - центр проекции, xy - плоскость объекта, $BDCF$ - область объекта, содержащаяся в изображении в приближении камеры-обскуры.

Выберем систему координат так, что плоскость объекта совпадает с плоскостью (xy). Точка O с координатами (x_0, y_0, z_0) - центр проекции, т.е. положение камеры. Луч OA - направление оптической оси камеры. В поле зрения камеры (в первом приближении)

попадает четырехугольник $BDCF$, A – точка пересечения его диагоналей. Величины углов AOB , AOC , AOD и AOF предполагаются равными (обозначим их величину через γ) и зависят от фокусного расстояния камеры. Рассмотрим треугольники, образованные центром проекции O (координаты которого нам нужно найти), вершинами четырехугольника B, D, C, F и точкой пересечения его диагоналей A (их координаты нам известны). После несложных геометрических расчетов находим угол γ :

$$\cos 2\gamma = \frac{AB^2 AC^2 AD^2 + AB^2 AC^2 AF^2 - AC^2 AD^2 AF^2 - AB^2 AD^2 AF^2}{2AB \cdot AC \cdot AD \cdot AF(AB \cdot AC - AD \cdot AF)}$$

Расстояние от камеры до точки пересечения ее оси с плоскостью объекта

$$OA = \frac{2AC \cdot AB \cos \gamma}{\sqrt{AC^2 + AB^2 - 2AC \cdot AB \cos 2\gamma}}$$

Определив угол ABO ($\sin^2 ABO = \frac{AB^2 \sin^2 2\gamma}{AB^2 + AC^2 - 2AB \cdot AC \cos 2\gamma}$), находим

расстояние $OB = \frac{CB \sin ACB}{\sin 2\gamma}$. Аналогично находим OD , OF и OC . Это - гипотенузы

треугольников $OO'B$, $OO'C$, $OO'D$ и $OO'F$. Решение системы уравнений с тремя неизвестными (координатами точки O) дает нам положение центра проекции, т.е. положение камеры, а направление оптической оси камеры задается лучом OA . Таким образом, по фотографии калибровочного объекта можно определить ориентацию и положение камеры при съемке, предварительно найдя соотношение между координатами в плоскости изображения и в плоскости объекта.

4.4. Реализация корреляционного способа калибровки оптической системы

Для определения матрицы дисторсионных искажений объектива используется специальным образом синтезированный калибровочный объект. Это должна быть плоская картина, подобная спекл-структуре. Подобные изображения используются в качестве фоновых картин, например, при корреляционных измерениях оптических неоднородностей в прозрачных средах. Разница в том, что в данном случае эта фоновая картина должна быть не просто случайной, а **известной** случайной структурой. После всей предварительной обработки корреляционные расчеты проводятся при сравнении не двух последовательных фотографий, а при сопоставлении фотографии и некоего двумерного массива чисел. Сначала синтезируется случайный двумерный массив с функцией автокорреляции малого размера. Этот массив превращают в файл в любом графическом формате (например, BMP или JPEG, в последнем возникают незначительные

шумы, связанные со сжатием), содержащий изображение случайного распределения черных и белых точек. Затем этот графический файл отображают на плоскость в некотором масштабе. Общее число информационных элементов получаемого таким образом калибровочного объекта и размер его при печати зависят от расстояния, с которого предполагается проводить съемку, и от фокусного расстояния оптической системы. Практика показывает, что линейный размер изображения одного информационного элемента для оптимальной работы корреляционного метода должен быть около трех пикселей приемной матрицы. Зависимость точности корреляционных расчетов от свойств обрабатываемых изображений рассматривалась подробно в главе 3. Искажения, вносимые печатающим устройством, пренебрежимо малы по сравнению с искажениями изображения при съемке (меньше в 30 – 50 раз).

Полученный калибровочный объект фотографируют тестируемой оптической системой (камерой). Из-за проективных искажений в кадр попадает область калибровочного объекта, представляющая собой неправильный четырехугольник (рис.4.3). Коэффициенты этих проективных преобразований вычисляются по парному соответствию реперных точек на калибровочном объекте и на изображении. Для четырех конкретных точек изображения корреляционным способом с субпиксельной точностью находят соответствующие координаты на калибровочном объекте. После этого взаимные линейные искажения компенсируются, но не проективным исправлением фотографии, а путем соответствующего искажения виртуального калибровочного объекта, который при этом приводится в соответствие с ракурсом съемки.

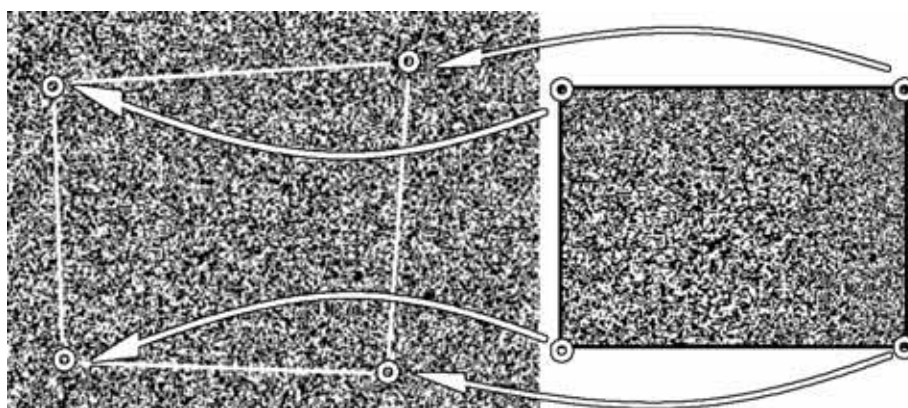


Рис.4.3. Иллюстрация процесса нахождения парных точек на снимке (справа) и на калибровочном объекте (слева).

Для максимальной точности определения параметров проективного преобразования в качестве реперных точек целесообразно использовать области угловых точек изображения. При этом при корреляционном сравнении изображения и

калибровочного объекта, деформированного путем вышеуказанных преобразований для соответствия ракурсу съемки, мы получаем картину, изображенную на рис.4.4 (а – в). На рис.4.4 (а) показана матрица горизонтальной составляющей смещения пикселей изображения за счет дисторсии, рис.4.4 (б) – вертикальная составляющая, на рис.4.4 (в) показано распределение абсолютных значений смещений в зависимости от координат в кадре. По вертикальной оси отложено значение сдвига в пикселях, по другим осям – условные координаты по полю кадра.

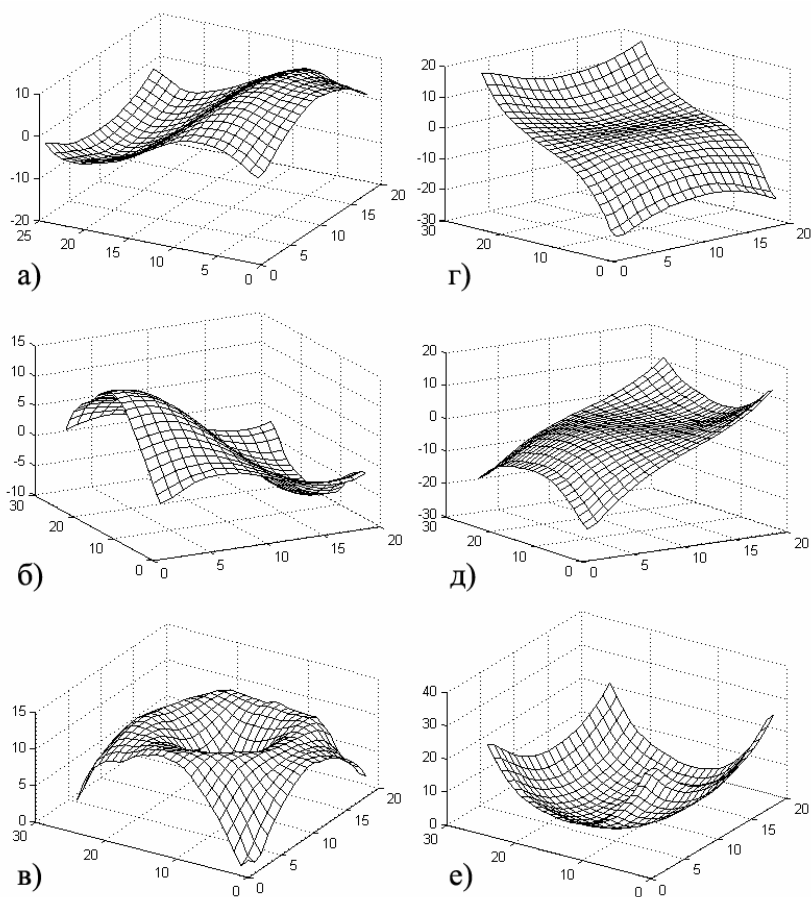


Рис.4.4. Типичный вид матрицы искажений. Данные рассчитаны для фотоаппарата Canon Power Shot A570 при размере кадра 1280x960 пикселей. Горизонтальные оси – условные координаты вдоль сторон кадра. Вертикальная ось – величина искажения в пикселях. Колонка а) – в) – данные без восстановления масштаба. Колонка г) – е) – данные после восстановления масштаба. а) и г) – горизонтальная составляющая матрицы, б) и д) – вертикальная составляющая, в) и е) – абсолютные значения.

Найденная таким образом матрица дисторсионного искажения достаточна для исправления кривизны снимка. Но истинный масштаб снимка при этом не восстанавливается, и получается, что значения дисторсионных искажений минимальны в углах кадра, там, где были выбраны реперные точки, а также в области, близкой к центру

кадра. Положение центрального минимума искажений соответствует положению центра дисторсии. Истинный вид матрицы дисторсии можно получить путем восстановления масштаба при естественном предположении, что вблизи центра дисторсии искажения минимальны. После введения поправки к масштабному преобразованию мы получаем искомое преобразование $P(R(r))$. В колонке г) – е) рис 4.4 приведены данные после восстановления масштаба.

Видно, что в центральной части кадра искажения минимальны, сильнее всего дисторсия сказывается в угловых областях. Для обычных цифровых фотоаппаратов среднего класса максимальная величина смещения положения точек изображения относительно идеального составляет десятки пикселей, до трех процентов от линейного размера изображения.

4.5. Экспериментальные результаты.

Для проверки возможностей метода нами исследован ряд цифровых фотоаппаратов различных производителей. Фотографировался специально отпечатанный плоский калибровочный объект, представляющий собой искусственную спекл-картину. Объект имел случайную бинарную структуру на квадратной сетке. Вероятность заполнения 0,5. Величина элемента структуры и соотношение фокусного расстояния камеры и расстояния от камеры до объекта выбирались так, чтобы линейный размер изображения элемента был около трех пикселей приемной матрицы фотоаппарата. Съемка проводилась «с руки», оптическая ось камеры была приблизительно перпендикулярна плоскости объекта. Надо отметить, что допустимы значительные отклонения от перпендикулярности, до 15 – 20 градусов. Основное условие – чтобы в углах кадра качество изображения калибровочного объекта было достаточным для определения корреляционной функции. При усреднении по десяти измерениям для максимальной величины смещения без восстановления масштаба величина стандартного отклонения изменялась от 0,2 до 0,5 пикселей. Стандартное отклонение для смещений с учетом масштаба колебалось от 1 до 3 пикселей. При определении центра дисторсии стандартное отклонение достигало 6 пикселей. Для различных фотоаппаратов для разных значений фокусных расстояний были получены матрицы сдвига. На рис.4.5 показаны центральные горизонтальные сечения матриц смещений для некоторых марок цифровых фотоаппаратов (для минимального фокусного расстояния и стандартизированной ширины кадра 1280 пикселей). По оси абсцисс – 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.

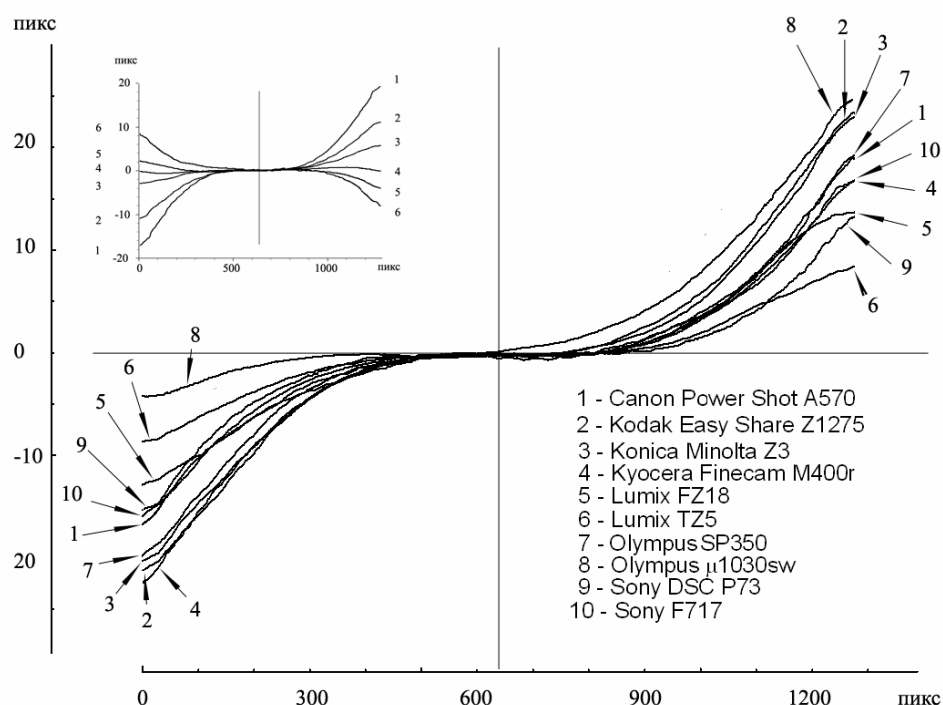


Рис.4.5. Центральные горизонтальные сечения матриц смещений (минимальное фокусное расстояние, ширина кадра 1280 пикселей). Ось x – координата вдоль кадра, ось y – величина горизонтальной составляющей матрицы смещений.

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.

На рис.4.6 для двух фотоаппаратов Sony и трех объективов Tamron с аппаратом Canon EOS 10D приведены кривые зависимости максимальной величины искажения от

фокусного расстояния объектива. По горизонтальной оси отложены эквивалентные фокусные расстояния объективов, по вертикальной оси – максимальные искажения в пикселях без учета масштаба. Размер матрицы аппарата Canon EOS 10D 22,7x15,1 мм, так что эквивалентные фокусные расстояния для объективов Tamron получаются умножением истинных фокусных расстояний на кроп-фактор 1,58. Для возможности сравнения все фокусные расстояния были взяты в пересчете для 35-мм камеры. Фотоаппарат Sony DSC P73: ПЗС матрица 1/2,7", фокусное расстояние объектива 6.0 - 18.0 мм, эквивалентно 39 - 117 мм для камер 35 мм, фотоаппарат Sony F717: ПЗС 2/3", фокусное расстояние 9,7-48,5мм, 38-190мм в эквиваленте для 35мм.

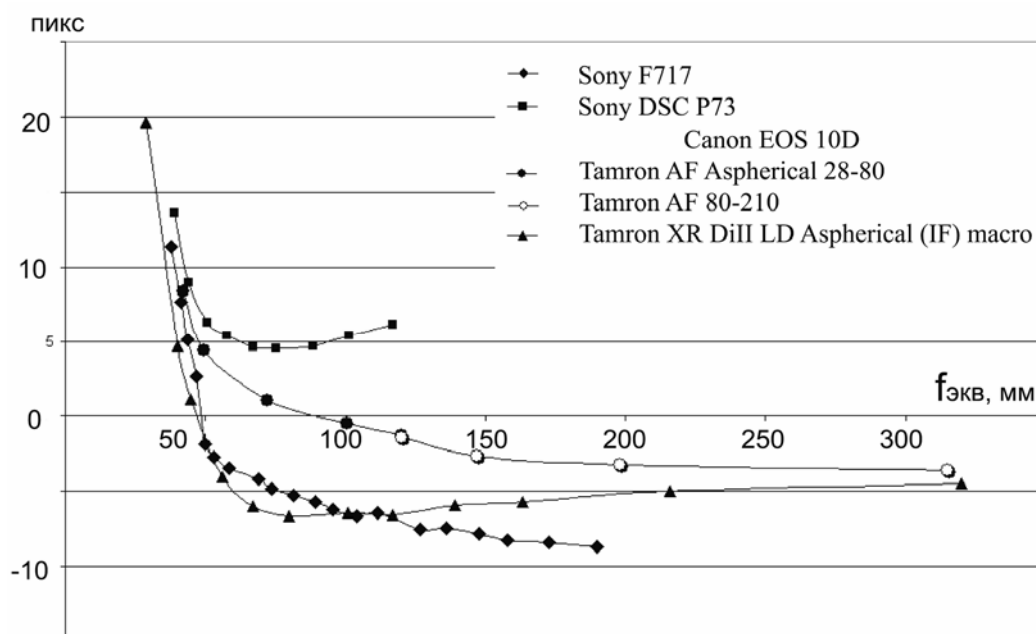


Рис.4.6. Кривые зависимости дисторсионных искажений от фокусного расстояния объектива. Абсцисса - эквивалентные фокусные расстояния объективов, ордината - максимальные искажения в пикселях (ширина кадра 1280 пикселей).

Видно, что при увеличении фокусного расстояния искажения резко уменьшаются, и для большинства объективов дисторсия уменьшается до нуля, а затем из бочкообразной становится подушкообразной, что на графике соответствует отрицательным значениям искажений.

По описанной выше схеме были исследованы геометрические искажения ряда сменных объективов, в основном советского производства с использованием цифровой камеры Canon EOS 10D. Большинство из них имеют фиксированное фокусное расстояние (ФФР).

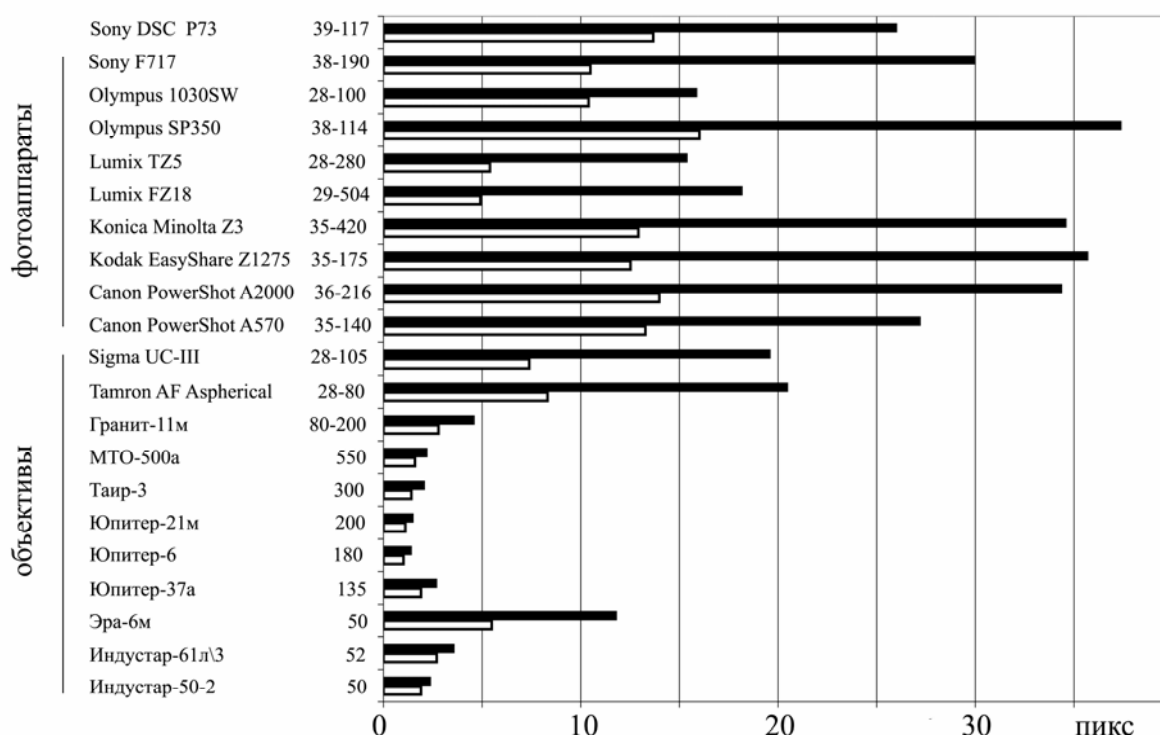


Рис.4.7. Максимальные значения искажений (при минимальном фокусном расстоянии для объективов с ПФ). Белые линии – по данным без учета масштаба. Черные линии - после восстановления масштаба. Ширина кадра 1280 пикселей. Числа показывают диапазон фокусных расстояний, для фотоаппаратов – эквивалентные, для объективов – по паспорту.

На диаграмме (рис.4.7) для некоторых фотоаппаратов и объективов приведены максимальные значения искажений (при минимальном фокусном расстоянии для перестраиваемых объективов). Белые линии соответствуют величинам искажений при приведении снимка к калибровочному объекту по углам. Черные линии показывают максимальную величину искажения после восстановления масштаба. Видно, что у объективов с ФФР искажения очень малы (0,2% - 0,6%), кроме широкоугольного объектива Эра 6М (1,9%). У объективов с перестройкой фокуса (ПФ) и у фотоаппаратов со встроенными объективами (также с ПФ) искажения находятся в диапазоне 2% - 4,5% (кроме объектива Гранит 11м, у которого искажения крайне малы по сравнению с другими объективами с ПФ – 0,6%). Следует отметить, что для сменных объективов, предназначенных для работы с пленочными фотоаппаратами, штатный размер кадра в полтора раза больше матрицы фотоаппарата Canon EOS 10D, с которым проводились измерения.

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.

Мы провели сравнение качества исправления снимков при использовании нашего метода с результатами, полученными с помощью программы Photoshop (версия CS4). Сравнение проводилось по величине остаточных искажений снимка калибровочного объекта после исправления дисторсии. В Photoshop-е никакими ухищрениями не удалось достичь остаточных искажений меньше 3-5 пикселей. Корреляционный метод дает величину остаточных искажений в пределах одного пикселя.

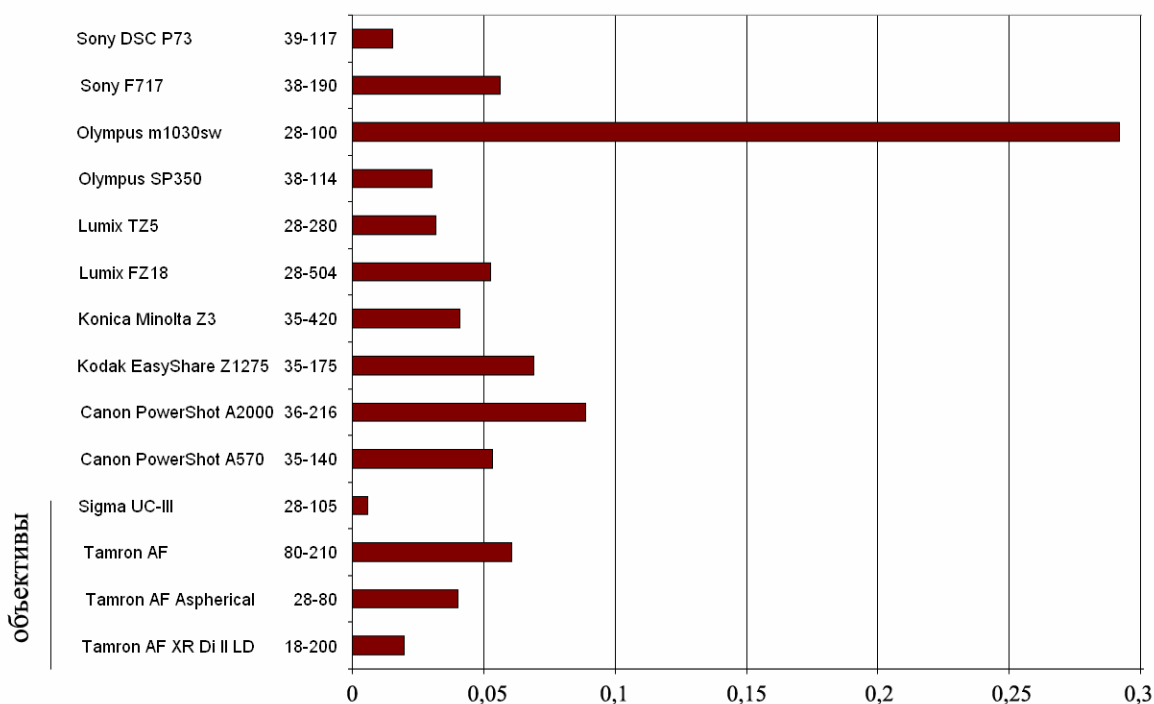


Рис.4.8. Отклонение центра дисторсии от центра кадра. По оси абсцисс – доли от ширины матрицы.

В процессе получения матрицы дисторсионных искажений определяется также и центр дисторсии. Данные по отклонению центра дисторсии от центра кадра (в долях от ширины матрицы) показаны на диаграмме (рис.4.8). У подавляющего большинства фотоаппаратов отклонение центра дисторсии от центра кадра не превышает 5 – 6 процентов от размера матрицы (50 пикселей при размере кадра 1280x960). При величинах

дисторсии 0,5% и ниже, как, например, у объективов Таир, Индустар, Юпитер центр не определялся.

У одного из исследованных фотоаппаратов, Olympus m1030SW центр дисторсии смещен от центра кадра на четверть размера приемной матрицы. На рис.4.9 показана форма рассчитанных для этого экземпляра матриц искажений. В верхней строке – без учета масштаба, нижняя строка – с восстановленным масштабным коэффициентом.

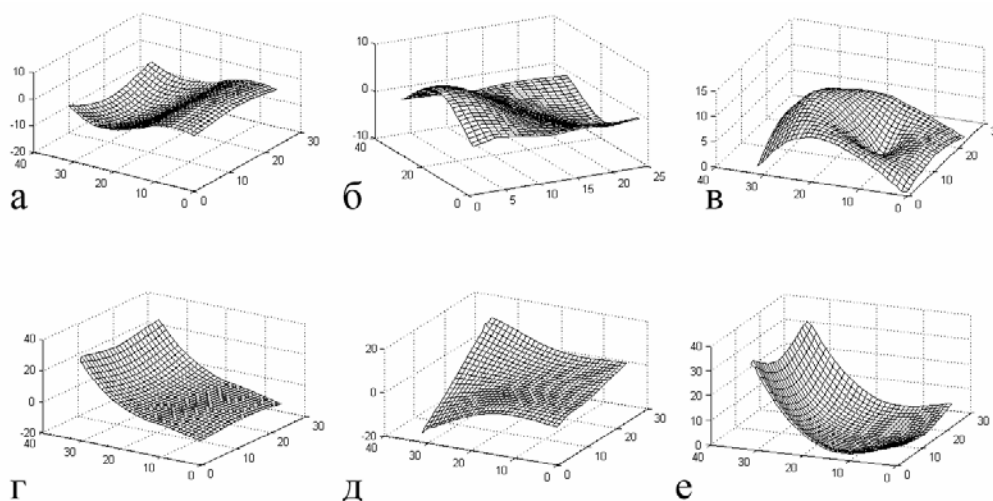


Рис.4.9. Вид матрицы искажений при сильном отклонении центра дисторсии от центра изображения. Данные рассчитаны для фотоаппарата Olympus m1030SW при размере кадра 1280x960 пикселей. Горизонтальные оси - условные координаты вдоль сторон кадра. Вертикальная ось – величина искажения в пикселях. а), б) и в) – данные без восстановления масштаба. г), д) и е) – данные после восстановления масштаба. а) и г) – горизонтальная составляющая матрицы, б) и д) – вертикальная составляющая, в) и е) – абсолютные значения.

Зная положение центра дисторсии, можно получить значения радиальной и тангенциальной компонент дисторсионных искажений. Тангенциальная компонента исчезающе мала практически у всех фотоаппаратов. Максимальное ее значение (порядка 0,15% при радиальной компоненте 2,3%) встретилось нам в фотоаппарате Sony F717.

С помощью корреляционного метода можно определять не только дисторсионные, но и хроматические искажения изображений. Для этого для окрестности каждой точки нужно найти корреляцию между разными цветовыми каналами изображения. Данные, приведенные ниже, отвечают только измерению рассогласования красного и синего (как наиболее далеко отстоящих по спектру) каналов изображения черно-белого объекта, получаемого в цифровом фотоаппарате. Не обсуждается, проводилась ли программная корректировка хроматизма в процессе обработки изображения процессорами

фотоаппаратов. Также не проводится анализ конкретного вида хроматических aberrаций (хроматизм положения, хроматизм увеличения, хроматические разности aberrаций).

На рис.4.10 показаны матрицы цветовых искажений (абсолютные значения расхождения красного и синего каналов) при минимальном фокусном расстоянии и для полного размера кадра. Рис. 4.10а и 4.10б – типичные формы поверхности искажения, соответственно для объектива Эра 6М с фотоаппаратом Canon EOS 10D и для фотоаппарата Sony DSC P73. Величина расхождения порядка долей пикселя. На рис.4.10в приведены данные для фотоаппарата Olympus SP350. Возможно, это неудачный экземпляр, но расхождение в положении синей и красной компонент изображения составило в одном из углов кадра больше трех пикселей.

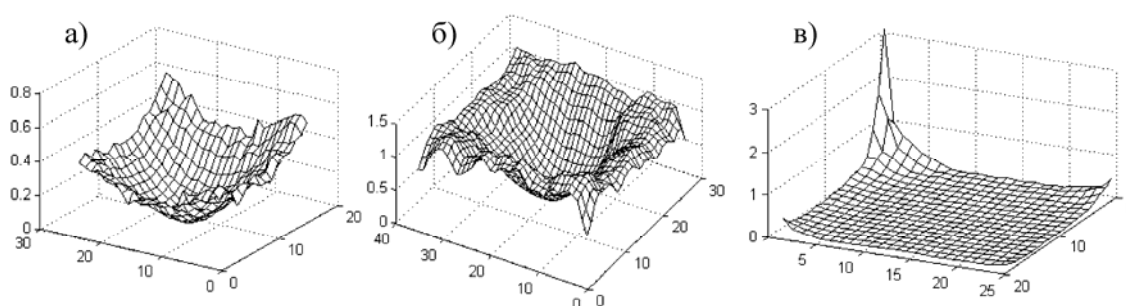


Рис.4.10. Матрицы цветовых искажений: а) – объектив Эра 6М с фотоаппаратом Canon EOS 10D (размер кадра 2048x1360 пикс), б) – Sony DSC P73 (размер кадра 2304x1728 пикс), в) – Olympus SP350 (размер кадра 3264x2448 пикс). Горизонтальные оси – условные координаты вдоль сторон кадра, вертикальные оси – искажения в пикселях.

На рис.4.11 приведены данные о рассогласовании цветовых каналов для некоторых фотоаппаратов и объективов. Приведены максимальные значения по полю зрения при максимально возможных для каждого аппарата размерах кадра (не приведенных к единой ширине 1280 пикселей, как на рис. 4.4 – 4.7). Для фотоаппаратов и объективов с ПФ взято минимальное фокусное расстояние. Более половины исследованных фотоаппаратов и объективов показывают рассогласование цветовых каналов не более 0,5 пикселя, а у четверти эта величина превышает 1 пиксель. Стандартное отклонение варьируется от 0,02 до 0,08 пикселей для разных серий измерений. Измерять величину расхождения каналов в пикселях (рис.4.11, слева) имеет смысл с точки зрения оценки качества цифрового (пиксельного) изображения. Что же касается величины расхождения в инвариантных единицах, которая относится скорее к характеристикам объектива, то, поскольку размеры пикселя в рассмотренных фотоаппаратах различны (от 1,7 мк у Canon Powershot 2000 и Olympus 1030SW до 7,4 мк Canon EOS 10D), соотношение характеристик объективов

становится несколько другим. Величины расхождения каналов в микронах показаны на рис.4.11 справа. У подавляющего большинства фотоаппаратов максимальное расхождение цветов не превышает двух микрон.

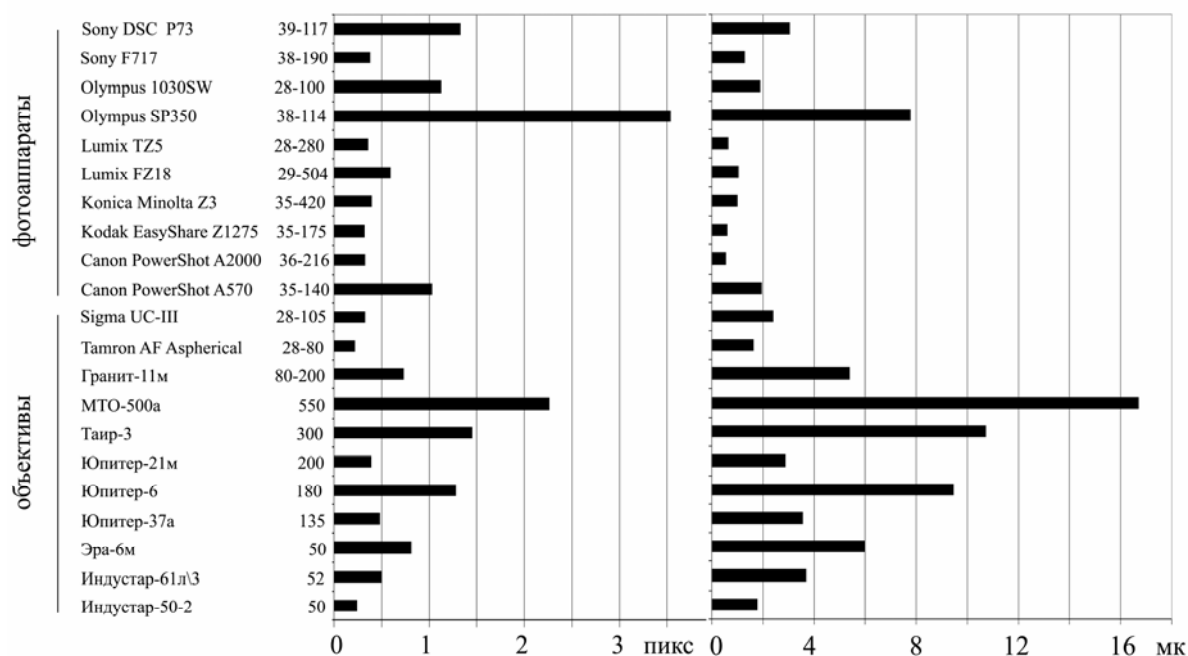


Рис.4.11. Максимальные абсолютные значения расхождения красного и синего каналов, слева – в пикселях, справа – в микронах. Минимальное фокусное расстояние, максимальный размер кадра.

Таким образом, основные результаты этой главы следующие. Корреляционный метод применим для выяснения степени геометрических искажений снимков. При этом калибровка выполняется предельно простым способом, без использования прецизионных измерительных систем и стендов, съемкой «с руки». Не делается никаких предварительных предположений о свойствах функции дисторсии (например, о радиальной симметрии). Мы получаем не полиномиальное приближение формы кривой дисторсии, а напрямую измеряем искажение в любой точке кадра. Были определены матрицы дисторсии ряда фотоаппаратов и сменных объективов, а также характеристики хроматических искажений для них. Для абсолютного большинства смещение красного и синего изображений оказалось максимально в углах кадра и не превышало долей пикселя. Дисторсионные искажения большинства объективов с фиксированным фокусом очень малы, порядка 0,5%. У объективов с перестройкой фокуса и у фотоаппаратов со встроенными объективами искажения оказались в диапазоне 2% - 4,5%. Для фотоаппаратов Sony и объективов Tamron была показана зависимость величины

дисторсионного искажения от величины фокусного расстояния. Отметим, что исследовались единичные экземпляры фотоаппаратов и объективов из имеющихся в наличии. Данные приведены только как демонстрация возможностей предложенного метода.

5. 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 вычислительном плане оказывается корреляционный метод обработки изображений. В этом методе осуществляется поточечное корреляционное сравнение двух изображений случайной картины, разница между которыми содержит искомую информацию. 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. Исследуются только такие искажения изображения, когда линейное увеличение изменяется по полю кадра, то есть дисторсия и хроматизм увеличения.

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.
3. 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 соответствует эпюрам 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.
4. 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.
5. 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%.

6. 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 находилось 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.
7. 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 $p = 0.5$.
 - Размер информационного элемента изображения (спекла) должен быть не меньше 2 пикселей приемной матрицы.
 - 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, 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.
- Для конкретных задач использован оптимальный выбор параметров в зависимости от масштаба неоднородностей в измеряемом поле деформаций. Получена точность корреляционных измерений взаимного сдвига двух цифровых изображений ~0.01 пикселя.

Благодарности

Выражаю благодарность моему учителю В.А.Зубову за многолетнюю помощь и поддержку, моему научному руководителю А.В.Крайскому за постоянное внимание и плодотворное обсуждение текущих результатов, Т.Т.Султанову за повседневную помощь в проведении экспериментов, а также А.В.Масалову и А.Д.Миронову за полезные обсуждения и ценные советы по тексту настоящей диссертации.

Автор также благодарен участникам семинаров Оптического отдела и конференций по оптическим методам исследования потоков, проводимым в МЭИ, где докладывались результаты настоящей диссертации.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках госконтракта № 14.740.11.0081 и соглашения № 8207.

Литература

1. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. М.: Наука. 1977.
2. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. - М.: Мир. 1982.
3. Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. М.: Наука, 1985.
4. Гудмен Дж. Статистическая оптика. Пер. с англ./Под ред. Г.В.Скороцкого. М.: Мир, 1988. 528с.
5. Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики. М.: Наука, 1971. 616 с.
6. Goodman J.W. Statistical properties of laser speckle patterns. // Laser speckle and related phenomena. Springer-Verlag, 1975. P.9-75.
7. Франсон М. Оптика спеклов. Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 171с.
8. Оптика когерентного излучения. Короленко П. В., учебное пособие.
9. В. П. Рябухо. Спекл-интерферометрия. Соросовский Образовательный журнал, том 7, №5, 2001.
10. Karasik A.Ya., Rinkevichius B.S., Zubov V.A. Laser Interferometry Principles. - New York, Boca Raton and etc.: CRC Press, 1995.
11. M. Sjö Dahl and L. R. Benckert, Electronic speckle photography: analysis of an algorithm giving the displacement with subpixel accuracy, Applied Optics, Vol. 32, No. 13, 1993
12. Systematic and random errors in electronic speckle photography, M. Sjö Dahl and L. R. Benckert, Applied Optics, Vol. 33, No. 31, 1994.
13. M. Sjö Dahl, Accuracy in electronic speckle photography, Applied Optics, Vol. 36, No. 13, 1997.
14. Gorbatenko B.B., Maksimova L.A., Ryabukho V.P. Reconstruction of the hologram structure from a digitally recorded Fourier specklegram Optics and Spectroscopy. 2009. Т. 106. № 2. С. 281-287.
15. Б.Б.Горбатенко, А.А.Гребенюк, Л.А.Максимова, О.А.Перепелицына, В.П.Рябухо. Спекл-фотография и голографическая интерферометрия с цифровой записью дифракционного поля в фурье-плоскости. Компьютерная оптика, т.34, №1, с.69-81, 2010.
16. B. Bhaduri, C. Quan, C. J. Tay, and M. Sjö Dahl, Simultaneous measurement of translation and tilt using digital speckle photography, Applied Optics, Vol. 49, No. 18, 2010.
17. Л.А.Максимова, Н.Ю.Мысина, А.А.Гребенюк, Б.Б.Горбатенко, В.П.Рябухо. Метод цифровой лазерной спекл-фотографии для измерения микроперемещений

- рассеивающих объектов, Изв. Саратовского университета. 2011. Т.11. Сер.Физика, вып. 2.
18. T.V.Mironova, T.T.Sultanov, 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. Т. 25. № 6. С. 495-510.
 19. 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. "Optical methods of flow investigation". V.6262, 2005.
 20. В.А.Зубов, Т.В.Миронова, 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.
 21. В.Н.Боркова, А.А.Емелин, В.А.Зубов, Т.В.Миронова, 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.
 22. В.Н.Боркова, А.И.Жуков, В.А.Зубов, Т.В.Миронова. Спекл - интерферометрия оптических неоднородностей в прозрачных средах – Труды VIII международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков". Москва 28 июня-1 июля 2005 года. Издательство МЭИ, с.256 – 259.
 23. Г.Е.Корбуков, В.В.Куликов, Е.Р.Цветов. Оптический гетеродинный метод корреляционной обработки изображений. – В кн.: Голография и обработка изображений. Л.: Наука, 1976, с.51-68.
 24. В.А.Зубов, А.В.Крайский, А.А.Меркин, Т.Т.Султанов. Корреляционная обработка двумерной оптической информации в процессе фотоэлектрической регистрации. Краткие сообщ. по физике, №10, 1978, с.35-42.
 25. В.А.Зубов, А.В.Крайский, Т.Т.Султанов. Обработка информации с использованием двух выходов интерференционного коррелятора. Краткие сообщ. по физике, №8, 1981, с.13-20.
 26. В.А.Зубов, А.В.Крайский, Т.Т.Султанов, Е.А.Сухобокова. Обработка фотографических случайных транспарантов в корреляторе со схемой модифицированного двухлучевого интерферометра. Препринт ФИАН, №213, 1984.

27. В.А.Зубов, А.В.Крайский, Т.В.Миронова, Т.Т.Султанов, А.Г.Хлебников. Оптико-электронная обработка случайных бинарных транспарантов. Автометрия, № 2, с.9, 1988.
28. А.П. Червонкин, В.Г. Родин, И.В. Солякин, С.Н. Стариков, Е.А. Шапкарина. Корреляционный анализ изображений в пространственно-некогерентном свете с использованием киноформа. Фотоника и информационная оптика. Научная сессия МИФИ-2006. Том 4.
29. Sutton M.A., Cheng M.Q., Peters W.H. et al. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis // Image and Vision Computing. 1986. Vol. 4, N 3. P. 143–151.
30. McNeill S.R., Peters W.H., Sutton M.A. Estimation of stress intensity factor by digital image correlation // Eng. Fracture Mech. 1987. Vol. 28, N 1. P. 101–112.
31. D. Lecompte, H. Sol, J. Vantomme and A. Habraken, "Analysis of speckle patterns for deformation measurements by digital image correlation", Proc. SPIE 6341, 63410E (2006); doi:10.1117/12.695276
32. Панин С.В., Сырякин В.И., Любутин П.С. Оценка деформации твердых тел по изображениям поверхности // Автометрия. 2005. Т. 41, № 2. С. 44–58.
33. S.Yoneyama, A.Kitagawa, K.Kitamura and H.Kikuta. In-Plane Displacement Measurement Using Digital Image Correlation with Lens Distortion Correction. JSME Int. Journal, Series A, Vol.49, No.3, 2006.
34. Giachetti A. Matching techniques to compute image motion // Image and Vision Computing. 2000. Vol. 18. P. 247–260.
35. Sutton M.A., J.-J. Orteu, H. Schreier. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. – University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 2009. – 364 p.
36. П.С. Любутин, С.В. Панин, Исследование точности и помехоустойчивости построения векторов перемещений при оценке деформаций оптико-телевизионным методом. Вычислительные технологии Том 11, № 2, 2006.
37. Thorsten Siebert, Matt J. Crompton. Application of High Speed Digital Image Correlation for Vibration Mode Shape Analysis. Proceedings of the SEM Annual Conference June 7-10, 2010 Indianapolis, Indiana USA
38. H.J.K. Lemmen, R.C. Alderliesten, R. Benedictus, J.C.J. Hofstede, R. Rodi. The power of Digital Image Correlation for detailed elastic-plastic strain measurements. WSEAS International Conference on engineering mechanics, structures, engineering geology (EMESEG '08), Heraklion, Crete Island, Greece, July 22-24, 2008
39. R.J. Adrian. "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics" // Annu. Rev. Fluid. Mech., Vol. 23, pp. 261-304, 1991.

40. Westerweel J. (1993) Digital Particle Image Velocimetry - Theory and Application. Delft: Delft University Press, 235 p.
41. Raffel M., Willert C., Kompenhans J. (1998) Particle image Velocimetry. A practical guide, Springer: Berlin.
42. Scarano F., Riethmuller M.L. (1999) Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete offset. *Exp. Fluids*, Vol. 26, pp. 513-523.
43. Scarano F. (2002) Iterative image deformation methods in PIV. Review article. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 13, R1-R19.
44. M. Raffel, C.E. Willert, S.T. Wereley, J. Kompenhans. *Particle Image Velocimetry*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
45. М.П. Токарев, Д.М. Маркович, А.В. Бильский. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости. *Вычислительные технологии*, т. 12, № 3, с. 109-131, 2007.
46. Meier, G.E.A., 1999. Hintergrund-Schlierenverfahren. Deutsche Patentanmeldung DE 199 42 856 A1.
47. Dalziel, S.B., Hughes, G.O. and Sutherland, B.R., 2000. Whole-field density measurements by 'synthetic schlieren'. *Experiments in Fluids*, 28(4), pp.322-335.
48. Richard, H. and M. Raffel. "Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method." Institute of Physics Publishing, *Meas. Sci. Technol.* **12** (2001) 1576–1585.
49. G.E.A. Meier. "Computerized background-oriented schlieren" // *Experiments in Fluids*, Vol. 33, pp. 181-187, 2002.
50. Richard H., Raffel M., Rein M., Kompenhans J., Meier G.E.A. (2000) Demonstration of the applicability of a background oriented Schlieren (BOS) method. In *Proc. of the 10th Int. Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon. Springer, Berlin Heidelberg NewYork.
51. F. Klinge, T. Kirmse, J. Kompenhans, Application of Quantitative Background Oriented Schlieren (BOS): Investigation of a Wing Tip Vortex in a Transonic Wind Tunnel. *Proceedings of PSFVIP-4*, June 3-5, 2003, Chamonix, France. F4097.
52. S. Raghunath, D. J. Mee, T. Roesgen, P. A. Jacobs. Visualization of supersonic flows in shock tunnels, using the background oriented schlieren technique. *Australian Aerospace Conference 2004*, University of Sydney, 12 December 2004.
53. L. Venkatakrisnan and G. E. A. Meier, Density measurements using the Background Oriented Schlieren technique, *Exp. Fluids*, Vol. 37, pp 237- 247, 2004.

54. A. Bichal, B. Thurow, Development of a Background Oriented Schlieren Based Wavefront Sensor for Aero-Optics. 40th Fluid Dynamics Conference and Exhibit 28 June - 1 July 2010, Chicago, Illinois.
55. F. Leopold, J. Simon, D. Gruppi and H. J. Schäfer, Recent improvements of the background oriented schlieren technique (BOS) by using a colored background, *Proc. 12th International Symposium on Flow Visualization*, German Aerospace Center (DLR), Göttingen, Germany, ISFV12-3.4, 2006.
56. E. Goldhahn and J. Seume, The background oriented schlieren technique: sensitivity, accuracy, resolution and application to a three-dimensional density field, *Exp. Fluids*, Vol. 43, pp 241-249, 2007.
57. E. Goldhahn, O. Alhaj, F. Herbst, and J. Seume. Quantitative Measurements of Three-Dimensional Density Fields Using the Background Oriented Schlieren Technique.
58. K. Kindler, E. Goldhahn, F. Leopold and M. Raffel, Recent developments in background oriented schlieren methods for rotor blade tip vortex measurements, *Exp. Fluids*, Vol. 43, pp. 233-240, 2007.
59. G. Schirripa Spagnolo, D. Ambrosini, A. Ponticiello and D. Paoletti. A Simple Method of Determining Diffusion Coefficient by Digital Laser Speckle Correlation. *J. Phys. III France* 6, 1996, pp.1117-1125.
60. D. Ambrosini, D. Paoletti, G. Schirripa Spagnolo, White-light digital speckle photography in free convection. *Optics Communications* 201 (2002) 39–44.
61. Evtikhieva O.A., Rinkevichius B.S., Tolkachev A.V. (2003) The computer laser refractive method for visualization of the spatially inhomogeneous and unstable liquid, gas and plasma flows. In: *Proc. 7th international scientific conference OMFI – 2003*. Eds. Yu. Dubnischev, B. Rinkevichius. Moscow, pp.332-337.
62. Popova E.M., Tolkachev A.V., Skornyakova N.M. (2003) Application of the BOS method for the natural convection investigations. *The 7th international scientific conference OMFI - 2003*, Eds. Yu. Dubnischev, B. Rinkevichius. Moscow, pp.126 – 129.
63. N. M. Skornyakova, E. M. Popova, B. S. Rinkevichius, A.V. Tolkachev. Correlation processing of BOS pictures. *5th International Symposium on Particle Image Velocimetry*, Busan, Korea, September 22-24, 2003 PIV'03 Paper 3209.
64. Znamenskaya, I.A., Vinnichenko, N.A. and Glazyrin F.N. Application of Background Oriented Schlieren method to the studies of flows of non-isothermal fluid. In: *8th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing*. Moscow, Russia 21-25 August 2011. Moscow.

65. В.Н.Боркова, А.В.Крайский, Т.В.Миронова, Т.Т.Султанов. Измерение градиентов оптической длины с помощью корреляционной обработки цифровых фотографий случайных картин. Краткие сообщения по физике ФИАН, 2006, №7, с. 38-41.
66. А.В.Крайский, Т.В.Миронова. Калибровка оптической системы корреляционным методом. Краткие сообщения ФИАН, М., 2008, №8, с. 14-24.
67. А.В.Крайский, Т.В.Миронова. 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.
68. D. C. Brown. Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, 37(8):855–866, 1971.
69. R. Y. Tsai. "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses", *IEEE Trans. Rob. Autom.*, RA-3(4), pp. 323-344, 1987.
70. Гельман Р.Н., Дунц А.Л. Лабораторная калибровка цифровых камер с большой дисторсией // *Геодезия и картография*. – 2002. - №7. – С. 23 – 31.
71. Юрченко В.И. Способ аналитической обработки неметрических снимков // *Геодезия и картография*. – 2000 - №11. – С. 23-30.
72. H.Farid and A.C.Popescu “Blind removal of lens distortion”, *Optical Society of America*, Vol.18. No 9, 2001.
73. G. Stein. Accurate internal camera calibration using rotation, with analysis of sources of error. In *ICCV*, pages 230–236, Cambridge, MA, June 1995.
74. R.Hartley and S.B.Kang. Parameter-free Radial Distortion Correction with Centre of Distortion Estimation. Texnical Report MSR-TR-2005-42. Microsoft Research, Microsoft Corporation.
75. Efficient and accurate camera calibration technique for 3-D computer vision. Sheng-Wen Shih, Yi-Ping Hung, and We-Song Lin. *Proc. SPIE* 1614, 133 (1992)
76. Mosaics of images from architectural and heritage structures. Ran Song and John E.Szymanski. *Proc. SPIE* 6279, 62790R (2007).
77. Easy and stable bronchoscope camera calibration technique for bronchoscope navigation system. K.Ishitani, D. Daisuke et al. *Proc. SPIE* 6509, 65091I (2007).
78. М.В.Конник, Э.А.Манькин, С.Н.Стариков. Расширение возможностей коммерческой цифровой фотокамеры для регистрации пространственных распределений интенсивности лазерного излучения. «Квантовая электроника», **40**, № 4 (2010)

79. Robert Austin. A Method for Measuring the Intensity of Light in a Headlamp Beam Pattern with a Digital Camera. Application Note for ECE 480, 2010.
80. Dietmar Wüller, Helke Gabele. The usage of digital cameras as luminance meters. Image Engineering, Augustinusstrasse 9d, 50226 Frechen, Germany. http://www.framos.eu/uploads/media/The_usage_of_digital_cameras_as_luminance_meters_EI_2007_6502_01.pdf
81. Erin M. Craine. Experiments Using Digital Camera to Measure Commercial Light Sources International Dark-Sky Association, docs.darksky.org/ Reports/ GlareMetricExperiment WriteUpFinal.pdf
82. J.E.Meyer, R.B.Gibbons, C.J.Edwards. Development and Validation of a Luminance Camera. Final Report, Virginia Tech Transportation Institute, 2009. http://scholar.lib.vt.edu/VTTI/reports/Luminance_Camera_021109.pdf
83. J. Hollan. RGB Radiometry by digital cameras. <http://amper.ped.muni.cz/light/luminance/english/rgr.pdf>
84. А.В.Крайский, Т.В.Миронова, Т.Т.Султанов, В.А.Постников, В.И.Сергиенко, В.Е.Тихонов. Способ измерения длины волны узкополосного светового излучения колориметрическим способом. Заявка на получение патента РФ на изобретение от 21.05.2008 рег №2008119917. Положительное решение о выдаче патента на изобретение от 09.02.2010 г., Патент РФ на изобретение №2390738, Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 27 мая 2010 г. , 27, Патент РФ № 2390738, 27 мая 2010.
85. А.В.Крайский, Т.В.Миронова, Т.Т.Султанов. Измерение поверхностного распределения длины волны узкополосного излучения колориметрическим методом. Квантовая электроника, 40, №7 (2010), с.652 - 658.
86. Papoulis A. Systems and Transforms with Applications in Optics. - New York and etc.: McGraw-Hill, 1968. Перевод: Теория систем и преобразований в оптике. - Москва: Мир, 1971.
87. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. - Москва: Наука, 1988.
88. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Москва: Наука, 1973.
89. <http://amlab.hs.ru>
90. J. Im, J. R. Jensen and J. A. Tullis. Object-based change detection using correlation image analysis and image segmentation. International Journal of Remote Sensing. Vol. 29, No. 2, 20 January 2008, 399–423.
91. R.R.Okhandiara, P.L.N. Rajub, W. Bijkerc. Neighborhood correlation image analysis technique for change detection in forest landscape. The International Archives of the

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B8. Beijing 2008.

92. Алтынцев М. Корреляционный анализ космических снимков, Исследование возможности применения корреляционного анализа фурье-образов изображений для автоматического дешифрования снимков. Сборник научных трудов аспирантов и молодых ученых Сибирской государственной геодезической академии. Вып. 7; под общ. ред. Т.А. Широковой. – Новосибирск: СГГА, 2010. – С. 57–63.
93. Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics, C.Tropea, A.L. Yarin, J.F. Foss, Springer, 2007.
94. У.Прэтт. Цифровая обработка изображений. М., Мир, 1982.
95. Hubert W. Schreier, Joachim R. Braasch and Michael A. Sutton, "Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation", Opt. Eng. 39, 2915 (2000).
96. Bing Pan, Kemaο Qian, Huimin Xie and Anand Asundi, "On errors of digital image correlation due to speckle patterns", Proc. SPIE 7375, 73754Z (2008).
97. Zhenxing Hu, Huimin Xie, Jian Lu, Tao Hua, and Jianguo Zhu, "Study of the performance of different subpixel image correlation methods in 3D digital image correlation," Appl. Opt. **49**, 4044-4051 (2010).
98. Таблицы физических величин. Справочник под редакцией И.К.Кикоина.
Online materials information resource, www.matweb.com.
99. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. VII. Теория упругости. 2007.
100. Н.В.Ефимов, Высшая геометрия, М., Наука, 1971.