

УДК 681.784

DOI 10.21685/2072-3059-2017-2-4

Д. В. Артамонов, А. Д. Семенов, А. В. Костюнин, И. В. Куприянов

АНАЛИЗ СПЕКЛОВОЙ КАРТИНЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектами исследования являются оптические системы, основанные на спекловой интерферометрии. Предметом исследования является спекловая картина – динамическая зернистая структура, формирующаяся в оптических системах, основанных на спекловой интерферометрии. Цель работы – выявление алгоритмических подходов, применимых к анализу различных видов спекловой картины с целью настройки оптической системы.

Материалы и методы. Исследования проводились с использованием лабораторной установки, предназначенной для генерации различных видов спекловой картины. Использовались методы кросскорреляционного анализа, трассерной визуализации и гранулометрии.

Результаты. Разработаны алгоритмические подходы по анализу движения спекловой картины при различных ее видах. Выявлена возможность анализа динамики спекловой картины путем применения кросскорреляционных алгоритмов, сочетание которых с методом трассерной визуализации позволяет определить характер движения спекла на разных участках анализируемой области. Гранулометрический анализ интенсивности спекловых точек способен идентифицировать состояние оптимальной настройки оптической системы.

Ключевые слова: спекловая интерферометрия, спекловая картина, оптическая система, кросскорреляционный алгоритм, метод трассерной визуализации, гранулометрия.

D. V. Artamonov, A. D. Semenov, A. V. Kostyunin, I. V. Kupriyanov

SPECKLE PICTURE ANALYSIS TO DEVELOP AN ALGORITHM OF AUTOMATIC OPTICAL SYSTEM ADJUSTMENT

Abstract.

Background. The research objects are optical systems based on speckle interferometry. The research subject is a speckle picture – a dynamic grain structure formed in optical systems based on speckle interferometry. The aim of the article is to reveal algorithms applicable for analyzing various types of speckle picture with the purpose of optical system tuning.

Materials and methods. The research was carried out using the laboratory equipment designed for generation of various types of speckle picture. The authors used methods of cross-correlation analysis, flow visualization and granulometry.

Results. The researchers have developed algorithms to analyze speckle picture motion at various types of the picture. They have revealed a possibility of analyzing speckle picture dynamics by using cross-correlation algorithms, the combination of which with flow visualization allows to determine a pattern of speckle motion in various parts of an analyzed area. A granulometric analysis of speckle point intensity is capable of identifying optimal tuning parameters for optical systems.

Key words: speckle interferometry, speckle pattern, optical system, cross-correlation algorithm, flow visualization method, granulometry.

Введение

Современные научные исследования и инженерные практические задачи решаются с использованием различных оптических систем. Например, в задачах исследования шероховатости и вибрационных параметров поверхностей, в рефрактометрии и т.д.

Объекты исследования могут иметь включения случайных неоднородностей, размер которых сопоставим с длинами световых волн. Данными неоднородностями могут быть флуктуации и взвеси, содержащиеся в среде, а также включения прозрачных элементов.

Практически во всех случаях ставится вопрос о выборе способа фокусировки оптической системы. Результативность исследований обеспечивается выбором средств автоматической фокусировки, адаптированных под решение конкретной задачи. Используемые в настоящее время способы фокусировки не являются исчерпывающими при решении некоторых задач [1, 2].

1. Постановка задачи

В оптометрии до настоящего времени сохраняется проблема определения параметров астигматизма глаза [1–3]. Любое нарушение осевой симметрии геометрических и оптических сред глаза свидетельствует о наличии астигматизма у пациента [1]. Согласно статистике, не менее 40 % людей по всему миру нуждаются в коррекции зрения в той или иной форме.

Таким образом, для решения задач по определению параметров коррекции зрения актуальна проблема разработки новых подходов по автоматической фокусировке оптических систем, в частности, на основе спекловой интерферометрии.

Параметры гиперметропии или миопии и астигматизма определяются специалистами-офтальмологами при помощи специальных приборов – авторефрактометров. Полученные параметры коррекции зрения уточняются при помощи подбора линз, что является субъективным методом. Кроме того, специалистами отмечается подверженность авторефрактометрии «миопии». Разные модели приборов выдают различные параметры коррекции зрения [1, 3].

Большой проблемой является компенсация искажений, вызванных локальными неоднородностями в зрительной системе глаза.

Согласно исследованиям в области офтальмологии при диагностике аномалий рефракции зрения выявлена потенциально высокая точность определения параметров оптической коррекции зрения применением лазерных спеклов [4, 5]. Однако на сегодняшний день так и не была решена проблема автоматизации настройки оптических систем, основанных на использовании спекловой интерферометрии.

При применении спекловой интерферометрии для диагностики зрения проявляется эффект отображения динамической зернистой структуры на сетчатке глаза, именуемой спекловой картиной (рис. 1). Наблюдая шероховатую поверхность в движении, освещенную монохроматическим излучением, пациент видит движение спекла. Наличие близорукости у пациента порождает видимый эффект движения спекловой картины в направлении, противоположном движению шероховатой поверхности, в случае дальновидности динамика движения спекла имеет направление, совпадающее с направлением

движения поверхности. Для состояния, соответствующего наилучшей фокусировке, характерно отсутствие явно выраженной направленности перемещения спекла. Такое состояние спекла представляется «кипящим» для пациента.

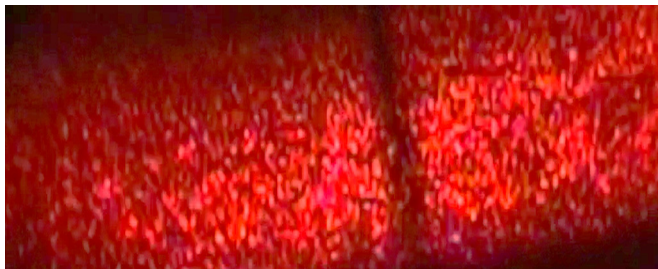


Рис. 1. Динамическая спекловая картина, формируемая на сетчатке глаза

Пациент при помощи джойстика регулирует состояние оптической системы прибора, отслеживая скорость и направление движения спекла с целью добиться «кипящего» вида спекловой картины. Таким образом, критерием настройки оптической системы может считаться такое состояние видимого изображения, при котором не наблюдается заметное однонаправленное движение «зерен» спекла.

Использование спеклов в диагностике зрения требует применения особых способов настройки оптических систем, отличных от используемых в существующих ныне авторефрактометрах (наивысшая частоты видеоизображения, максимальный контраст, максимальная спектральная частота) [6, 7]. Таким образом, возникает необходимость в проведении исследований по разработке методов автоматической настройки оптических систем с использованием спекловой интерферометрии, в первую очередь для офтальмологического прибора, предназначенного для определения параметров оптической коррекции зрения.

2. Оптическая система прибора

В составе оптической системы прибора для диагностики зрения имеется лазер 6 (рис. 2), создающий инфракрасное когерентное излучение, и движущаяся шероховатая диффузная поверхность 5. Она же является зрительным стимулом для пациента и освещается дополнительным вторым лазером в видимом диапазоне излучения (не показан на рис. 2). Пациент рассматривает поверхность через оптическую систему с перестраиваемой оптической силой, которая включает две линзы: зафиксированную 3 и перемещающуюся 4.

Излучение пропускается на дно глазного яблока пациента 7 полупрозрачным зеркалом 2, создавая на нем картины спекла, одна из которых (в инфракрасном диапазоне) записывается при помощи видеокамеры 1. Из практики авторефрактометрии было выявлено, что картина спекла, регистрируемая при помощи видеокамеры в инфракрасном диапазоне, дает наилучшее совмещение с поверхностью сетчатки глаза. Оптическая система выполняет корректирующую функцию очковой линзы, которая совместно с оптическими свойствами глаза дает на сетчатке сфокусированное изображение «предмета», а именно, формирует «кипящий» спекл за счет перемещения линзы 4.

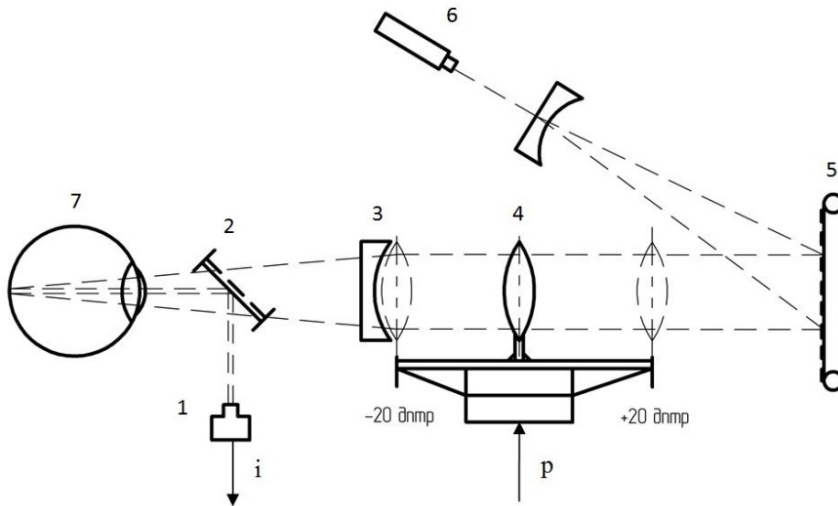
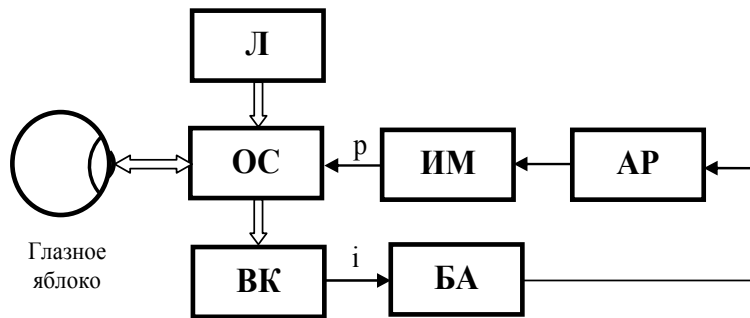


Рис. 2. Структура оптической системы прибора

Осуществление коррекции зрения пациентом вручную не дает гарантии точной настройки оптики прибора. Особенно это актуально при диагностировании состояния зрения у детей и недееспособных людей. Цель работы состоит в замене ручного регулирования положения линзы 4 на автоматическую фокусировку. Комплекс автоматики перемещает линзу 4 за счет контроля динамики спекловой картины, добиваясь состояния «кипящего» спекла.

3. Система автоматической настройки и алгоритмы анализа спекловой картины

Структурная схема системы автоматического управления представлена на рис. 3.



ОС – оптическая система; Л – лазер; ВК – видеокамера;
БА – блок анализа спекловой картины; АР – автоматический регулятор;
ИМ – исполнительный механизм

Рис. 3. Структурная схема автоматической системы

С выхода оптической системы (ОС) цифровой видеокамерой регистрируется спекловая картина в инфракрасном диапазоне и поступает в блок анализа (БА), в котором производится анализ динамики спекла.

На основе результатов анализа БА автоматический регулятор (АР) генерирует сигнал управления исполнительным механизмом (ИМ), который выполняет перестройку оптики прибора с целью достижения ее фокусировки.

Автоматизация процесса настройки оптической системы прибора требует разработки методологии анализа спекловой картины в динамике, которая является предметом данной статьи и послужит основой для разработки алгоритма работы блока анализа движения спекловой картины.

Динамику спекловой картины можно классифицировать в трех случаях [8]:

- динамика спекловой картины характеризуется высокими скоростями движения (более 20 пикселей/с). В этом случае спекловая картина имеет вид стабильного по направлению движения потока. Спекловая картина обладает высоким значением плотности точек спекла (коэффициент плотности образов частиц $N \sim 10$). В связи с этим не представляется возможным идентифицировать отдельно взятые частицы картины спекла, а значит, неприменимы траекторные методы анализа. По результатам исследований для данного вида динамики была установлена применимость кросскорреляционного алгоритма обработки видеоизображения спекла;

- при скорости потока меньше 20 пикселей/с наблюдается неравномерный вид динамики картины спекла. В данном случае возможно сочетание методов цифровой трассерной визуализации с кросскорреляционным анализом; трассерная визуализация подразумевает разбиение области анализа на участки, анализируемые кросскорреляционным методом на предмет направления и модуля скорости движения динамического потока;

- при состоянии спекла, близком к «кипящему», осложняется анализ потока кросскорреляционным методом из-за малого и хаотичного сдвига спекловых точек за весьма малое время их существования. Однако представляется возможным анализировать спекловую картину, используя методы гранулометрии [9].

Динамика постоянной и равномерной спекловой картины анализируется с использованием кросскорреляционного алгоритма измерения скорости.

Подход состоит в следующем. В области анализа выделяется сегмент размером $d_x \times d_y$, анализируемый на последовательных кадрах видеоизображения. Соседние кадры имеют дискретные функции, обозначенные как $I_1(x, y)$ и $I_2(x, y)$ соответственно.

Рассчитывается кросскорреляционная функция:

$$\Phi_{I_1 I_2}(m, n) = \sum_{l=-d_y/2}^{d_y/2} \sum_{l=-d_x/2}^{d_x/2} I_1(k, l) \cdot I_2(k + m, l + n).$$

Далее осуществляется нахождение координат максимума кросскорреляционной функции, затем производится расчет перемещения и направления (угла) движения максимума относительно центра расчетной области (рис. 4).

Немаловажным является процесс выбора оптимального разрешения области расчета. Данный параметр напрямую влияет на эффективность и быстроту работы кросскорреляционного алгоритма анализа динамики картины спекла.

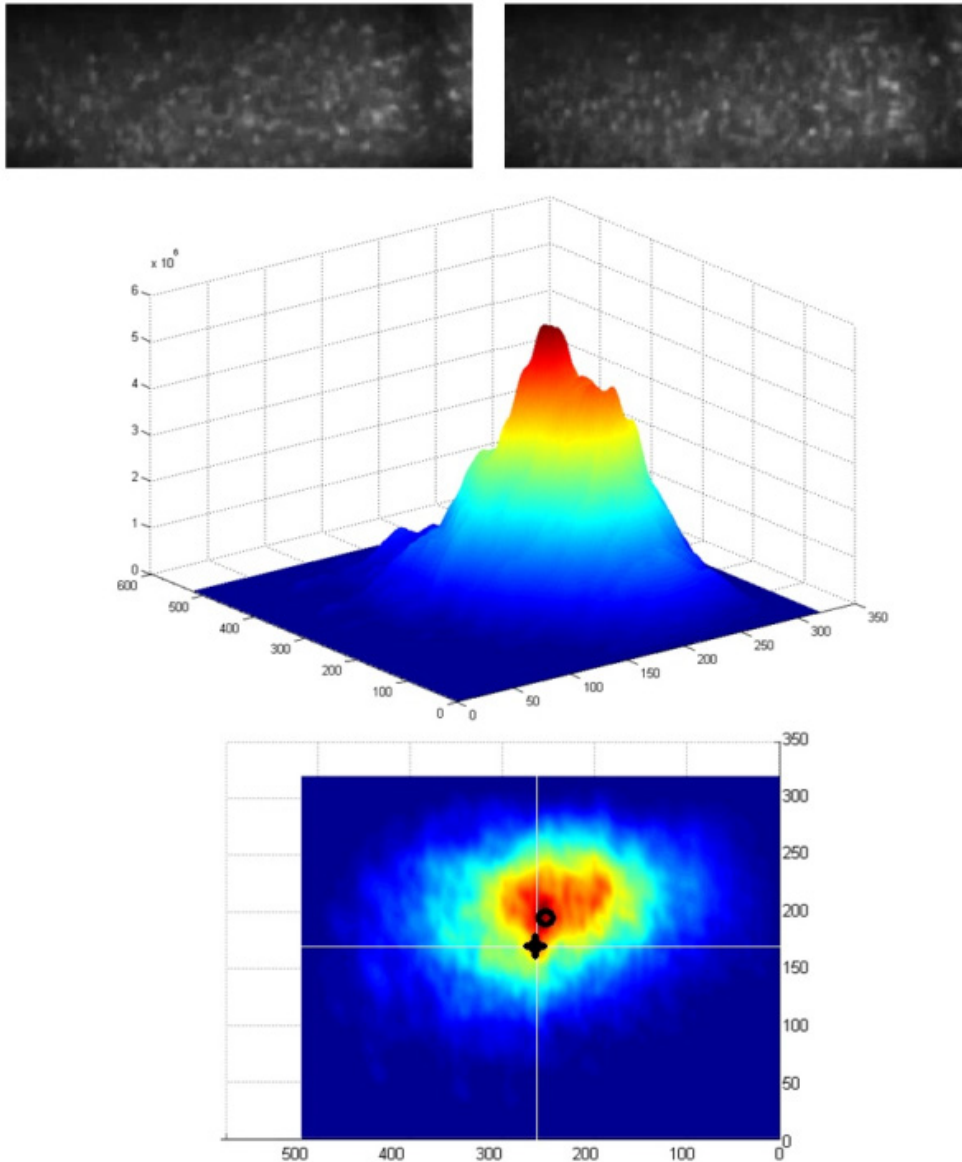


Рис. 4. Кросскорреляционный метод в применении к анализу динамики спекловой картины

На рис. 5 представлен пример применения кросскорреляционного метода измерения скорости к спекловой картине при разрешениях области расчета от 50×200 до 50×50 пикселей. График включает зависимости рассчитанной средней скорости и угла для 10 последовательных кадров видеозображения спекловой картины, дисперсий скорости и угла, а также времени вычисления от разрешения кадра.

Выбор оптимального разрешения области расчета сопряжен с противоречием между двумя факторами: с одной стороны, наилучшая точность вычислений достигается при высоких разрешениях, однако при этом продолжительность вычислений становится слишком большой (рис. 5). Также при ма-

лых разрешениях расчетных областей отслеживается резкий рост дисперсии модуля скорости, а вычисление угла направления движения спеклового потока не производится.

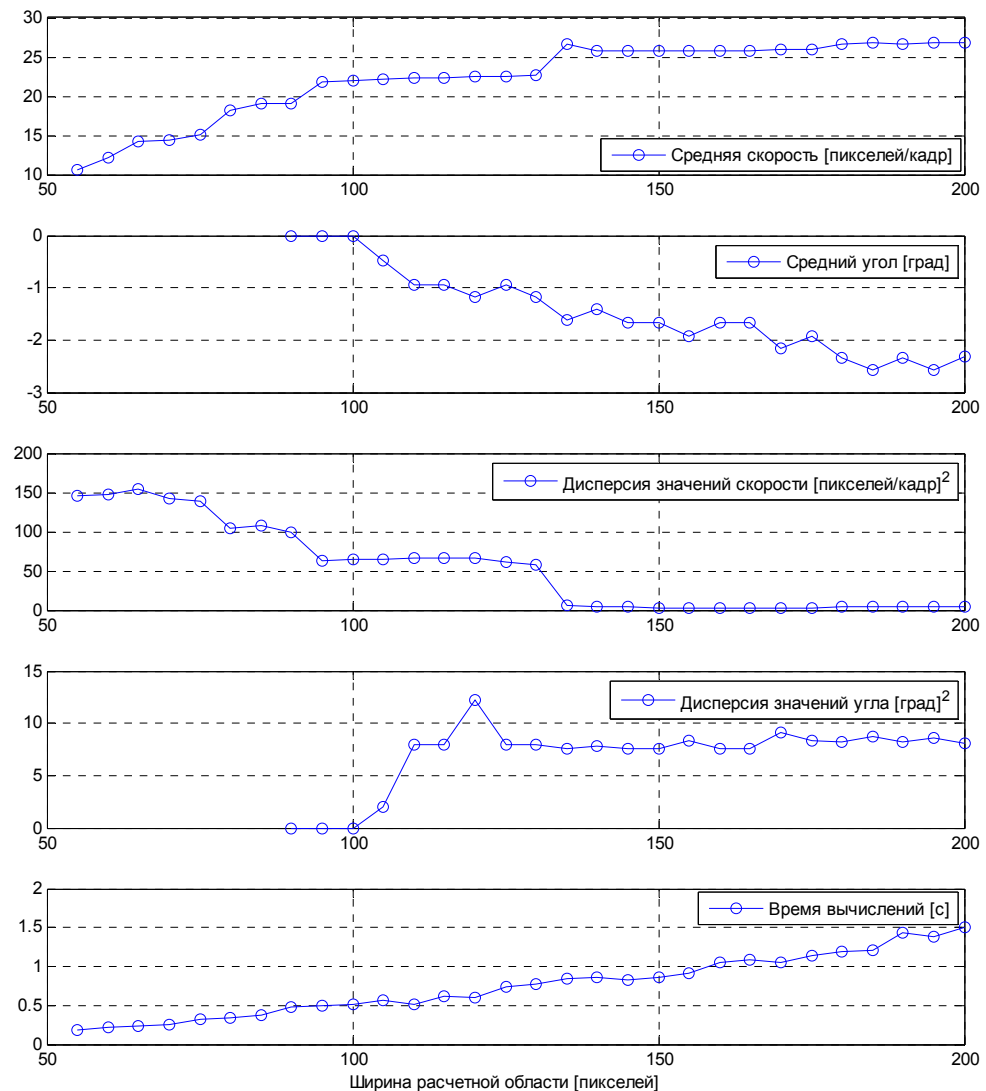


Рис. 5. Анализ работы метода кросскорреляционного анализа в применении к динамике картины спекла

Также стоит отметить, что дисперсия угла направления движения не уменьшается с увеличением разрешения областей расчета.

Получение наиболее корректных значений скорости сопряжено с минимальным уровнем дисперсии. Согласно рис. 5 разрешение области расчета, равное 50×140 пикселей, следует считать наиболее оптимальным с учетом необходимого быстродействия и достаточным для корректного вычисления параметров динамики потока с использованием метода кросскорреляционного анализа картины спекла.

Для неравномерного движения потока спекла возможно применение методов цифровой трассерной визуализации. Рисунок 6 поясняет принцип разделения области исследования на сегменты, анализируемые на предмет модуля скорости и направления потока.

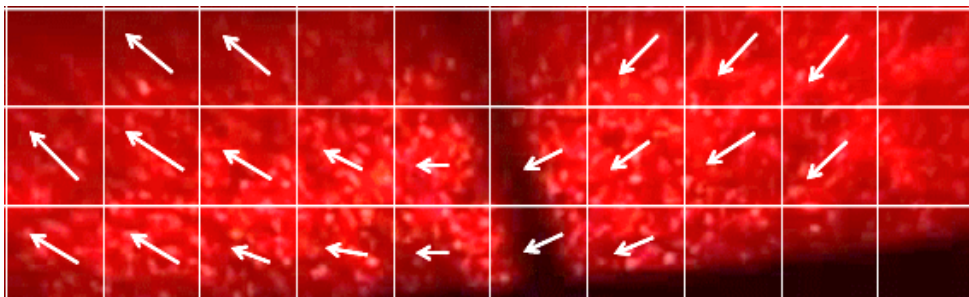


Рис. 6. Пояснение принципа цифровой трассерной визуализации на примере динамики неравномерного спекла

Пример использования метода для неоднородного спекла представлен на рис. 7. Область исследования делится на четыре сегмента изображения. Каждый сегмент анализируется с помощью кросскорреляционного алгоритма. При исходном разрешении анализируемой области 300×100 пикселей каждый участок имеет разрешение 150×50 пикселей. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

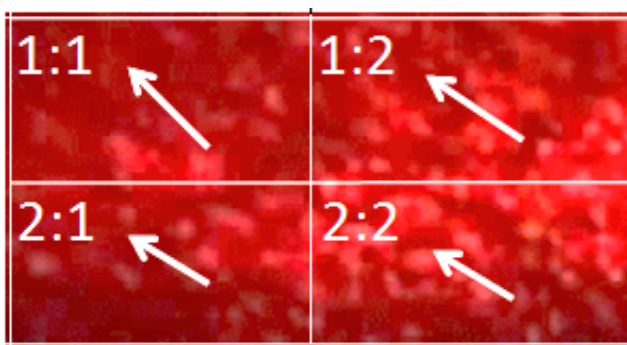


Рис. 7. Анализируемая область

Таблица 1

Результаты расчетов

Позиция участка	Скорость, пикселей/с	Угол, град	Время вычислений, с
1:1	18,6	116,6	2,30
1:2	17,2	128,4	2,40
2:1	17,4	131,9	2,40
2:2	15,4	136,7	2,10

Монотонность изменения векторов скорости соседних сегментов может быть использована в качестве характеристики степени однородности спе-

кловой картины и говорить об адекватности вычислений с помощью данного метода в задаче анализа динамики вихревого спекла.

В числе возможных подходов по анализу картины спекла при «кипящем» виде динамики можно рассматривать гранулометрический анализ, суть которого состоит в измерении и классифицировании объектов изображения по одному из параметров, таким как интенсивность и размер.

Представим формируемый в приборе динамический спекловый поток в качестве дисперсной системы. Таким образом, спекловые точки будут выступать в роли дисперсного «вещества». Рассмотрим картину спекла в статике и проанализируем интенсивность спекловых точек.

Выполним расчет функции зависимости суммы пикселей раскрытого изображения (интенсивности) от величины радиуса элементов в применении к трем различным изображениям «кипящего» спекла (рис. 8).

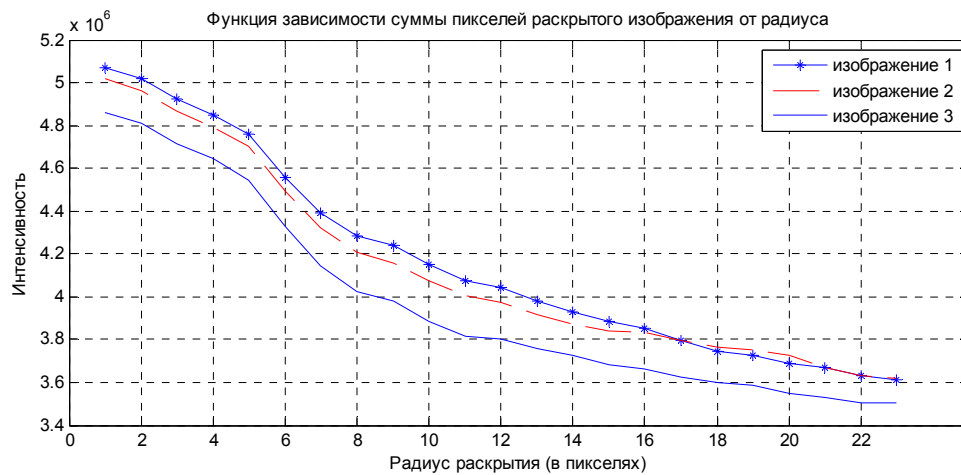


Рис. 8. График функции зависимости интенсивности раскрытого изображения от радиуса раскрытия

Проанализируем график первой производной, являющийся параметром, характеризующим распределение объектов изображения, полученного путем проведения анализа с использованием гранулометрии (рис. 9).

Отметим минимумы на графике (рис. 9), характеризующие объекты изображения наименьшего размера (спекловые точки). Из графика видно, что наиболее распространенным радиусом спекловых точек является $R = 5$ пикселей.

Подберем опытным путем значения радиусов точек спекла, дающие наиболее адекватные изображениям-источникам картины восстановленного спекла.

Рисунок 10 иллюстрирует исходные и соответственно восстановленные при помощи алгоритма гранулометрии изображения спекла. Характерно, что имеется четкое соответствие интенсивностей (яркости) точек спекла на восстановленных изображениях им же на исходных изображениях.

Анализ радиусов и интенсивностей точек спекла при «кипящем» виде динамики способен позволить сформировать критерий оптимальной настройки оптической системы.



Рис. 9. Производная функции зависимости интенсивности раскрытого изображения от радиуса раскрытия

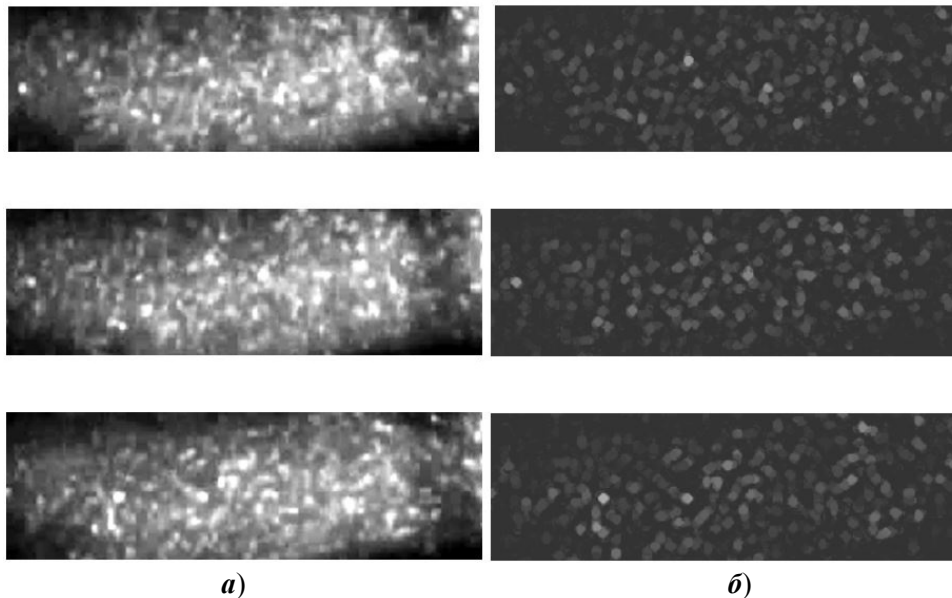


Рис. 10. Исходные изображения картины спекла (*a*) и восстановленные картины спекла с применением градулометрии (*б*)

Исследования проводились при поддержке «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере».

Заключение

1. Произведен анализ динамики спекловой картины, считываемой оптической системой со дна глазного яблока.
2. Установлено три основных особенности движения спекловых картин: равномерное движение на высоких скоростях (более 20 пикселей/с), неравномерное движения спекловой картины (от 5 до 20 пикселей/с), «кипящий» вид динамики спекла.

3. Предложено для движения на высоких скоростях спекла использовать кросскорреляционный алгоритм анализа движения спекловой картины, при неравномерном движении – использовать методы цифровой трассерной визуализации, при кипящем спекле – использовать методы гранулометрического анализа.

4. Произведенные экспериментальные исследования движения спеклов подтверждают применимость указанных подходов к исследованию динамики спекловой картины.

Библиографический список

1. **Розенблюм, Ю. З.** Оптометрия (подбор средств коррекции зрения). – 2-е изд., испр. и доп. – СПб. : Гиппократ, 1996. – 320 с.
2. **Яхницкая, Л. К.** Современные методы диагностики и коррекции астигматизма / Л. К. Яхницкая, В. Л. Гончарова, Ю. Г. Федоров, Н. Ф. Змачинская // Медицинские новости. – Минск : Изд-во Белорус. гос. ун-та, 2002.
3. **Орлова, Н. С.** Коррекция зрения : учеб. пособие для вузов России / Н. С. Орлова, Г. И. Осипов. – 2-е изд., доп. – Новосибирск : Сибмедиздат НГМУ, 2007. – 226 с.
4. Применение методов Фурье-оптики / под ред. Г. Старка. – М. : Радио и связь, 1988. – 536 с.
5. **Шаповалов, С. Л.** Лазерная оптометрия : моногр. / С. Л. Шаповалов, Т. И. Милявская, С. А. Игнатьев. – М. : МИК, 2012. – 192 с.
6. **Костюнин, А. В.** Проектирование автоматической системы определения параметров оптической коррекции зрения на основе спекловой интерферометрии / А. В. Костюнин, И. В. Куприянов, М. С. Ревунов // Перспективные информационные технологии (ПИТ-2015) : тр. Междунар. науч.-техн. конф. / под ред. С. А. Прохорова. – Самара : Изд-во Самар. науч. центра РАН, 2015. – Т. 1. – 360 с.
7. **Костюнин, А. В.** Автоматическая система определения параметров оптической коррекции зрения на основе спекловой интерферометрии / А. В. Костюнин, И. В. Куприянов, М. С. Ревунов // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию Победы в Великой Отечественной войне (г. Пенза, 19–21 мая 2015 г.) : в 2 т. / под ред. д.т.н., проф. М. А. Щербакова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – Т. 1. – 452 с.
8. **Костюнин, А. В.** Оценка движения спекловой картины в задаче автоматизации функционирования офтальмологического прибора на основе технологии спекловой интерферометрии / А. В. Костюнин, А. Д. Семенов, И. В. Куприянов, В. П. Субботина // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации : тр. XXIV Междунар. науч.-техн. конф. (г. Алушта, 14–20 сентября 2015 г.). – М. : Изд. дом МЭИ, 2015. – 300 с.
9. **Конкина, Е. О.** Применение гранулометрии в оценке неравномерности бумаги / Е. О. Конкина, А. Д. Семенов // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию Победы в Великой Отечественной войне (г. Пенза, 19–21 мая 2015 г.) : в 2 т. / под ред. д.т.н., проф. М. А. Щербакова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – Т. 1. – 452 с.

References

1. Rozenbljum Ju. Z. *Optometrija (podbor sredstv korrekcii zrenija)* [Optometry (selection of vision correctional means)]. 2nd ed. Saint-Petersburg: Gippokrat, 1996, 320 p.

2. Jahnickaja L. K., Goncharova V. L., Fedorov Ju. G., Zmachinskaja N. F. *Medicinskie novosti* [Medical news]. Minsk: Belorusskij gosudarstvennyj universitet, 2002.
3. Orlova N. S., Osipov G. I. *Korrekcija zrenija: ucheb. posobie dlja vuzov Rossii* [Vision correction: textbook for Russian Universities]. 2nd ed. Novosibirsk: Sibmedizdat NGMU, 2007, 226 p.
4. *Primenenie metodov Fur'e-optiki* [Application of Fourier optics]. Ed. by G. Stark. Moscow: Radio i svjaz', 1988, 536 p.
5. Shapovalov S. L., Miljavskaja T. I., Ignat'ev S. A. *Lazernaja optometrija: monogr.* [Laser optometry: monograph]. Moscow: MIK, 2012, 192 p.
6. Kostjunin A. V., Kuprijanov I. V., Revunov M. S. // *Perspektivnye informacionnye tehnologii (PIT-2015): tr. Mezhdunar. nauch.-tehn. konf.* [Prospective information technologies: proceedings of scientific and technical conference]. Samara: Izdatel'stvo Samarskogo nauchnogo centra RAN, 2015, vol 1, 360 p.
7. Kostjunin A. V., Kuprijanov I. V., Revunov M. S. *Problemy avtomatizacii i upravlenija v tehniceskikh sistemah: sb. st. Mezhdunar. nauch.-tehn. konf., posvjashh. 70-letiju Pobedy v Velikoj Otechestvennoj vojne (g. Penza, 19-21 maja 2015 g.): v 2 t.* [Problems of automation and control in technical systems: proceedings of the International scientific and technical conference devoted to the 70th anniversary of the Victory in the Great Patriotic War (Penza, 19th–21st May 2015): in 2 volumes]. Penza: Izd-vo PGU, 2015, vol. 1, 452 p.
8. Kostjunin A. V., Semenov A. D., Kuprijanov I. V., Subbotina V. P. *Sovremennye tehnologii v zadachah upravlenija, avtomatiki i obrabotki informacii: tr. XXIV Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. (g. Alushta, 14–20 sentjabrja 2015 g.)* [Modern technologies in control, automation and data processing: proceedings of XXIV International scientific and technical conference (Alushta, 14th–20th September 2015)]. Moscow: Izdatel'skij dom MJeI, 2015, 300 p.
9. Konkina E. O., Semenov A. D. *Problemy avtomatizacii i upravlenija v tehniceskikh sistemah: sb. st. Mezhdunar. nauch.-tehn. konf., posvjashh. 70-letiju Pobedy v Velikoj Otechestvennoj vojne (g. Penza, 19–21 maja 2015 g.): v 2 t.* [Problems of automation and control in technical systems: proceedings of the International scientific and technical conference devoted to the 70th anniversary of the Victory in the Great Patriotic War (Penza, 19th–21st May 2015): in 2 volumes]. Penza: Izd-vo PGU, 2015, vol. 1, 452 p.

Артамонов Дмитрий Владимирович
доктор технических наук, профессор,
кафедра автономных информационных
и управляющих систем, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: aius@pnzgu.ru

Семенов Анатолий Дмитриевич
доктор технических наук, профессор,
кафедра автоматики и телемеханики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: sad-50@mail.ru

Artamonov Dmitriy Vladimirovich
Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of autonomous information
and control systems, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Semenov Anatoliy Dmitrievich
Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of automation and remote
control, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Костюнин Александр Васильевич

кандидат педагогических наук,
профессор, кафедра общей физики
и методики обучения физике,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: kostjunin@mail.ru

Kostyunin Aleksandr Vasil'evich

Candidate of pedagogical sciences,
professor, sub-department of general
physics and methods of teaching physics,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Куприянов Илья Витальевич

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: kup-92@yandex.ru

Kupriyanov Il'ya Vital'evich

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 681.784

Артамонов, Д. В.

Анализ спекловой картины для разработки алгоритма автоматической настройки оптических систем / Д. В. Артамонов, А. Д. Семенов, А. В. Костюнин, И. В. Куприянов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 2 (42). – С. 42–54. DOI 10.21685/2072-3059-2017-2-4