

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ И ПРОСЛЕЖИВАНИЯ СОСУДОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ГЛАЗНОГО ДНА

Р. Г. Хафизов^а, доктор техн. наук, профессор

Д. Г. Хафизов^а, канд. техн. наук, доцент

Е. Г. Танаева^{а, б}, аспирант, врач-офтальмолог

^аПоволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, РФ

^бРеспубликанская офтальмологическая больница им. Г. И. Григорьева, Йошкар-Ола, РФ

Введение: описание состояния сосудов сетчатки по изображениям глазного дна является повседневной процедурой в офтальмологической практике. Как объект для диагностической интерпретации цифровые фотографии глазного дна представляют собой классический пример медицинских изображений, характеризующийся особой сложностью. Для автоматизации диагностического описания состояния сосудов сетчатки необходимо выделить основных диагностических признаков, таких как толщина и направление сосудов. **Цель исследования:** разработка алгоритма оценивания толщины и направления сосудов глазного дна, позволяющего автоматизировать процедуру визуализации сосудов сетчатки и упростить задачу мониторинга. **Результаты:** предложена методика оценивания толщины и направления сосудов сетчатки, основанная на исследовании статистических характеристик изображений глазного дна. В качестве наблюдаемой статистики использована нормированная разность оценок генеральных средних. Получена зависимость оценки толщины сосуда от степени зашумленности тестового изображения. Разработан алгоритм прослеживания сосудов на изображении глазного дна. **Практическая значимость:** предложенный алгоритм может быть использован для создания медицинских экспертных систем, позволяющих автоматизировать процесс оценивания состояния сосудов сетчатки, мониторинга состояния сосудов и частично решить задачу диагностики.

Ключевые слова — изображения глазного дна, сосуды сетчатки, статистический анализ изображений, прослеживание сосудов.

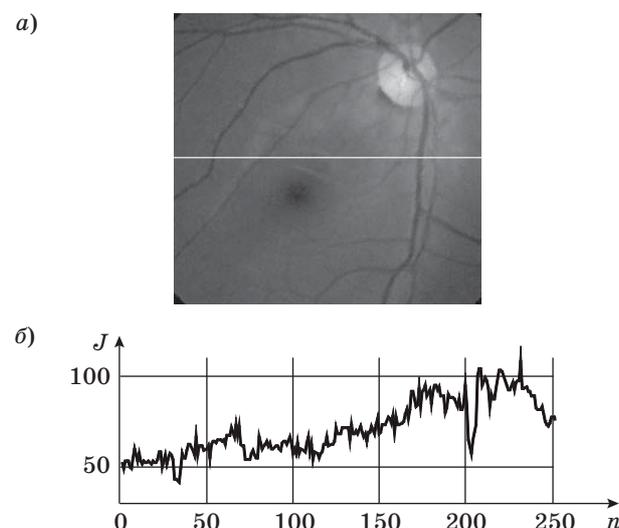
Введение

Прозрачность оптических сред глаза позволяет наблюдать сосудистую систему сетчатки и другие структуры глазного дна прямым и неинвазивным способом. Анализ изменений кровеносных сосудов глазного дна дает интегральную характеристику состояния сосудов организма в целом и состояния зрительной системы в частности. Изменение соотношения диаметра артерий и вен, локальные изменения диаметра сосудов, повышенная извилистость сосудов и другие изменения являются ранними признаками поражения сосудов сетчатки при таких заболеваниях, как артериальная гипертензия, системный атеросклероз, вегетососудистая дистония, ретинопатия недоношенных и т. д. [1].

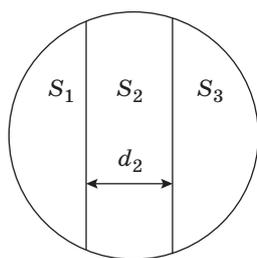
В качестве основных диагностических параметров, на основе которых производится формирование диагностических признаков сосудов, выделяют такие характеристики сосудов, как толщина и направление [2]. Эти параметры представляют собой локальные характеристики, рассчитываемые непосредственно в процессе прослеживания сосудов. В настоящее время существуют различные способы оценки толщины сосудов на изображении глазного дна [2–4]. Целью данной работы является разработка методики оценивания толщины и направления сосудов, основанной на исследовании статистических характеристик изображений, и алгоритма прослеживания сосудов на изображении глазного дна.

Методика оценивания толщины и направления сосудов

Существующие подходы к оцениванию толщины сосудов на изображении глазного дна используют, как правило, срез функции яркости изображения, взятый перпендикулярно направлению сосудов (рис. 1, а и б). При этом изображение глазного дна является статистически неодно-



■ Рис. 1. Участок глазного дна (а) и сечение по яркости выделенной строки (б)



■ **Рис. 2.** Вид строба для оценивания параметров и прослеживания сосудов

родным, и оценивание параметров объектов, расположенных на изображении, становится сложной задачей.

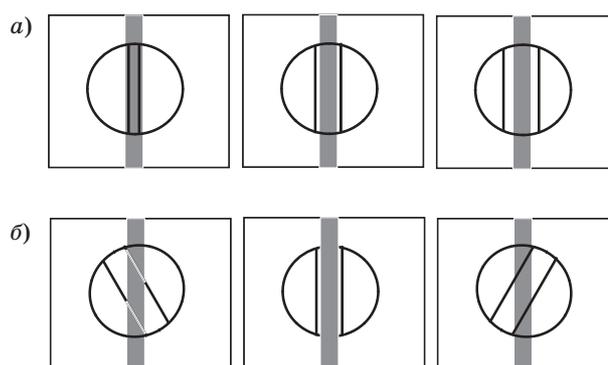
Для оценивания толщины и направления сосудов на изображении глазного дна предлагается форма строба, показанная на рис. 2 [5, 6].

Строб представляет собой три примыкающие друг к другу области S_1 , S_2 и S_3 . Необходимо на основании фрагментов случайных полей в пределах пар областей S_1 , S_2 и S_3 вынести решение в пользу гипотезы о том, что точки, образующие область S_2 , относятся к изображению сосуда, а точки, образующие области S_1 и S_3 , принадлежат фону. При этом разница между выборками, взятыми из областей S_1 и S_2 , и выборками, взятыми из областей S_2 и S_3 , носит систематический характер. Конкурирующая гипотеза соответствует утверждению о том, что области S_1 , S_2 и S_3 или одна из пар областей S_1 , S_2 и S_2 , S_3 принадлежат либо фону, либо одному и тому же изображению. Выборки, взятые из этих областей, статистически не отличаются друг от друга, и наблюдаемая между ними разница носит случайный характер.

По выборкам значений яркости из областей S_1 , S_2 и S_3 получим оценки генеральных средних $\bar{\xi}_1$, $\bar{\xi}_2$ и $\bar{\xi}_3$ соответственно. Объем выборки в пределах одного окна достаточно велик, и в связи с этим создаются предпосылки для выполнения центральной предельной теоремы теории вероятностей. Поэтому оценка $\bar{\xi}$ генеральной средней подчиняется нормальному закону распределения. Разница оценок $\bar{\xi}_1$ и $\bar{\xi}_2$, как и разница оценок $\bar{\xi}_3$ и $\bar{\xi}_2$, также будет иметь нормальное распределение вероятностей.

В качестве наблюдаемой статистики используем нормированную разность оценок генеральных средних с учетом того, что в нашем распоряжении вместо дисперсии генеральной совокупности σ^2 имеются ее оценки, полученные по выборкам ξ_1 , ξ_2 и ξ_3 :

$$t_{1,2} = \frac{\bar{\xi}_1 - \bar{\xi}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}; \quad t_{3,2} = \frac{\bar{\xi}_3 - \bar{\xi}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_3^2}{n_3} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}.$$



■ **Рис. 3.** Процесс варьирования ширины области S_2 (а) и углового положения строба (б)

Тогда при $t_{1,2} \geq t_0$ и $t_{3,2} \geq t_0$, где t_0 — пороговое значение критерия, установленное в соответствии с принятой величиной доверительной вероятности, принимается гипотеза, что точки, образующие область S_2 , относятся к изображению сосуда, а точки, образующие области S_1 и S_3 , принадлежат фону. Во всех остальных случаях принимается гипотеза о том, что области S_1 , S_2 и S_3 или одна из пар областей S_1 , S_2 и S_2 , S_3 принадлежат либо фону, либо одному и тому же изображению.

Для оценивания толщины сосудов варьируется ширина d_2 области S_2 (рис. 3, а). Считается, что состояние строба выбрано наилучшим, если в результате вариации ширины d_2 достигнуты максимальные значения $t_{1,2}$ и $t_{3,2}$.

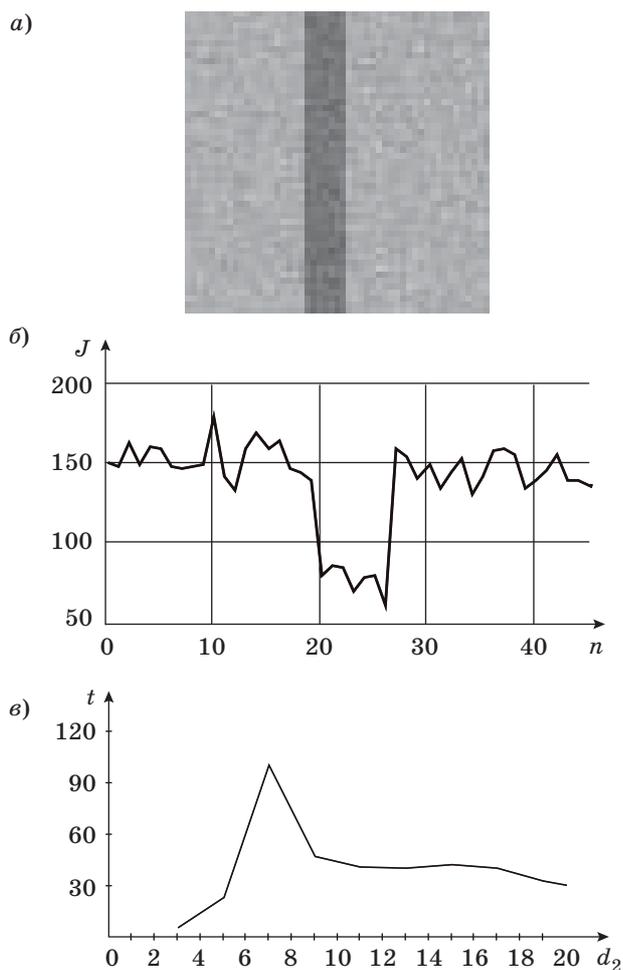
Аналогичным образом производится оценивание направления сосуда, но при этом варьируется угловое положение строба на изображении (рис. 3, б).

Алгоритм прослеживания сосудов на изображении глазного дна

Предложенная методика оценки толщины и направления сосудов была исследована с использованием тестового изображения (рис. 4, а), параметры которого были априорно известны (рис. 4, б).

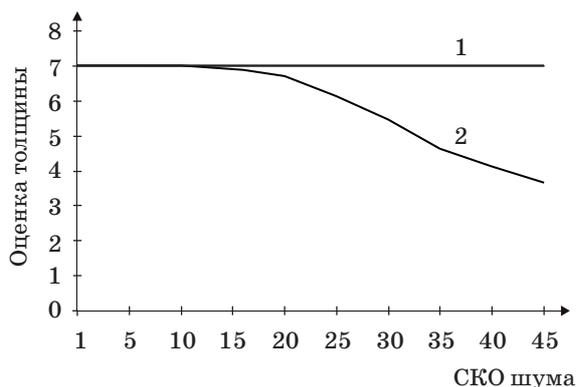
На рис. 5, в представлена зависимость величины t при варьировании ширины области S_2 для тестового изображения. Максимальное значение величины t достигается при $S_2 = 7$, что соответствует действительности. Исследована зависимость оценки толщины сосуда от степени зашумленности тестового изображения (рис. 5) при использовании предложенной методики (линия 1) и непосредственной аппроксимации по методу наименьших квадратов (линия 2).

Таким образом, предложенная методика позволяет достаточно надежно производить оценивание параметров сосудов.



■ **Рис. 4.** Тестовое изображение (а), срез по яркости по одной из строк (б) и результат вычисления величины t при варьировании ширины области S_2 (в)

Исходная точка для прослеживания определяется в результате обнаружения сосуда на изображении глазного дна. При этом может быть использована методика, предложенная в работе [5]. Вторая и последующие точки находятся следующим образом. Центр строга устанавливается на исходную точку. Затем происходит адаптация строга, т. е. определение оптимального направления перемещения и ширины d_2 центральной части строга S_2 . Считается, что состояние строга выбрано оптимально, если в результате вариации направления перемещения и ширины d_2 достигнуты максимальные значения $t_{1,2}$ и $t_{3,2}$. Если выполняются условия $t_{1,2 \max} > t_0$ и $t_{3,2 \max} > t_0$, то принимаются данное направление движения и значение ширины центральной части строга. После адаптации центр строга перемещается в выбранном направлении на один пиксель, и в массив памяти заносится единичный вектор, соединяющий предыдущую точку, в которой на-



■ **Рис. 5.** Зависимость оценки толщины сосудов от СКО шума тестового изображения



■ **Рис. 6.** Участок глазного дна и результат прослеживания сосудов

ходилась центр строга, с текущей. Набор векторов перемещения строга образует траекторию. Прослеживание прекращается, если значения $t_{1,2 \max}$ и $t_{3,2 \max}$ оказываются ниже порога срыва слежения.

Пример применения алгоритма прослеживания сосудов на изображении глазного дна на основе предложенной методики оценки толщины и направления сосудов представлен на рис. 6.

В результате прослеживания сосудов на изображении глазного дна формируются траектории сосудов в виде наборов векторов перемещений строга. Кроме того, каждому вектору перемещения поставлено в соответствие значение толщины сосуда в данной точке. На основе этих данных производится формирование диагностических признаков сосудов.

Заключение

В работе предложена методика оценивания толщины и направления сосудов, основанная на исследовании статистических характеристик изображений. В качестве наблюдаемой статистики использована нормированная разность оценок

генеральных средних. Получена зависимость оценки толщины сосуда от степени зашумленности тестового изображения при использовании предложенной методики и непосредственной аппроксимации по методу наименьших квадратов. Разработан алгоритм прослеживания сосудов на изображении глазного дна.

Литература

1. Ильясова Н. Ю., Устинов А. В., Баранов В. Г. Экспертная компьютерная система диагностики глазных заболеваний по изображениям глазного дна // Компьютерная оптика. 1999. № 19. С. 202–209.
2. Куприянов А. В., Ильясова Н. Ю. Разработка информационной технологии оценивания геометрических параметров изображений глазного дна // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2008. № 2. С. 221–234.
3. Бранчевский С. Л. и др. Система цифрового анализа для диагностики сосудистой патологии глазного дна / С. Л. Бранчевский, Н. А. Гаврилова, Н. Ю. Ильясова,

- А. Г. Храмов // Вестник офтальмологии. 2003. № 5. С. 37–40.
4. Ильясова Н. Ю., Липка Д. Е., Куприянов А. В. Применение искусственных нейронных сетей для оценивания диагностических параметров на биомедицинских изображениях // Компьютерная оптика. 2003. № 25. С. 151–154.
5. Введение в контурный анализ и его приложение к обработке изображений и сигналов / под ред. Я. А. Фурмана. — М.: Физматлит, 2002. — 592 с.
6. Танаева Е. Г., Хафизов Р. Г. Алгоритм выделения сосудистой системы сетчатки на изображениях глазного дна на основе контурного анализа // Символ науки. 2016. № 1. С. 102–107.

UDC 621.391

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.102

Algorithm of Parameter Estimation and Vessel Tracking on Eye Fundus Images

Khafizov R. G.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, hafizovRG@volgatech.net

Khafizov D. G.^a, PhD, Tech., Assistant Professor, hafizovdg@volgatech.net

Tanaeva E. G.^{a,b}, Post-Graduate Student, Ophthalmologist, elena-309@mail.ru

^aVolga State University of Technology, 3, Lenin Sq., 424000, Yoshkar-Ola, Russian Federation

^bRepublican G. I. Grigoriev Ophthalmologic Hospital, 68a, Proletarskaya St., 424000, Yoshkar-Ola, Russian Federation

Introduction: Description of retinal blood vessel state by fundus images is a daily procedure in ophthalmological practice. As an object for diagnostic interpretation, digital fundus images are a classic example of medical images of extreme complexity. In order to automate the diagnostic description of retinal blood vessels, we have to highlight the major diagnostic features like the thickness and direction of the vessels. **Purpose:** We develop an algorithm for estimating the thickness and direction of the fundus vessels, which would allow us to automate the retinal vessel imaging procedures and simplify the monitoring. **Results:** A technique is proposed for estimating the retinal vessel thickness and direction, based on studying the statistical parameters of fundus images. A normalized difference of the estimates of the universe means was used as observed statistics. It is described how the vessel thickness estimation depends on the test image noise level. An algorithm for tracking retinal vessels is developed. **Practical relevance:** The proposed algorithm can be used for creating medical expert systems which would allow you to automate the evaluation of retinal vessel state, to monitor the vascular condition, and to assist in diagnostics.

Keywords — Fundus Images, Retinal Vessels, Statistical Image Analysis, Vessel Tracking.

References

1. Ilyasova N. Yu., Ustinov A. V., Baranov V. G. An Expert Computer System for Diagnosing Eye Diseases from Retina Images. *Komp'yuternaia optika* [Computer Optics], 1999, no. 19, pp. 202–209 (In Russian).
2. Kupriyanov A. V., Ilyasova N. Yu. Development of the Information Technology for Estimation of Fundus Image Geometric Parameters. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aërokozmoshcheskogo universiteta* [Herald of the Samara State Aerospace University], 2008, no. 2, pp. 221–235 (In Russian).
3. Branchevsky S. L., Gavrilova N. A., Ilyasova N. Yu., Khramov A. G. A System of Digital Analysis for the Diagnostics of Vascular Pathologies of the Eye Fundus. *Vestnik oftal'mologii* [Herald of Ophthalmology], 2003, no. 5, pp. 37–40 (In Russian).

4. Ilyasova N. Yu., Lipka D. Ye., Kupriyanov A. V. Use of Artificial Neural Networks for Estimating Diagnostic Parameters in Biomedical Images. *Komp'yuternaia optika* [Computer Optics], 2003, no. 25, pp. 151–154 (In Russian).
5. *Vvedenie v konturnyi analiz i ego prilozhenie k obrabotke izobrazhenii i signalov* [Contour Analysis Introduction and its Image and Signal Processing Application]. Ed. by Ya. A. Furman. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 592 p. (In Russian).
6. Tanaeva E. G., Khafizov R. G. Retinal Blood Vessels Selection Algorithm of the Fundus Images Based on Contour Analysis. *Simvol nauki* [Symbol of Science], 2016, no. 1, pp. 102–107 (In Russian).