

УДК 004.832

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА РЕНТГЕНОГРАММ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ЛОКАЛЬНЫЕ ОКНА В ЗАДАЧАХ ОБНАРУЖЕНИЯ ПАТОЛОГИЙ¹

Статья поступила в редакцию 04.10.2017, в окончательном варианте – 28.10.2017.

Малютина Ирина Алексеевна, Юго-Западный государственный университет, 305004, Российская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19Б
аспирант, e-mail: Irina92_2010@mail.ru

Кузьмин Александр Алексеевич, Юго-Западный государственный университет, 305004, Российская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19Б

кандидат технических наук, доцент, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7980-0673> SCOPUS <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=36142241500>, ResearcherID <http://www.researcherid.com/rid/F-8405-2013>, e-mail: ku3bmin@gmail.com, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=616342

Шаталова Ольга Владимировна, Юго-Западный государственный университет, 305004, Российская Федерация, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19Б

кандидат технических наук, доцент, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0901-9272>, SCOPUS <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24477712800>, ResearcherID <http://www.researcherid.com/rid/C-3687-2015>, e-mail: shatolg@mail.ru, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=673680

Предложены методы и алгоритмы классификации изображений на рентгенограммах грудной клетки, основанные на анализе локальных окон изображения. На первом иерархическом уровне анализа в локальных окнах формируются «слабые» классификаторы, построенные на основе двух подходов к анализу данных. Подход к построению «слабого» классификатора по первому методу основан на анализе амплитудных спектров Фурье в скользящем окне. Рентгеновское изображение последовательно сканируется окнами различного масштаба. В каждом окне определяется амплитудный спектр Фурье, на основе которого строят «слабый» классификатор. Он относит фрагмент изображения, попавшего в скользящее окно, к определенному классу. Второй метод построения «слабого» классификатора основан на использовании дескрипторов, полученных в результате аппроксимации гистограмм яркости в окне анализа. «Слабые» классификаторы, основанные на двух методах анализа, получают столько, сколько масштабов окон анализа было выбрано. На втором иерархическом уровне проведения анализа объединяются решения «слабых» классификаторов в рамках каждого метода анализа первого иерархического уровня путем построения сильного классификатора. Окончательное решение «принимает» финальный классификатор, агрегирующий решения двух сильных классификаторов второго иерархического уровня. Достоинством такого подхода является объединение преимуществ методов, основанных на анализе энергетических и структурных свойств локальных окон.

Ключевые слова: рентгенограмма грудной клетки, классификатор, окно анализа, гистограмма яркости, двумерный спектр Фурье, агрегатор решений, алгоритмы, программное обеспечение

METHODS AND ALGORITHMS OF ANALYZING CHEST RADIOGRAPHS USING LOCAL WINDOWS FOR PATHOLOGY DETECTION

The article has been received by editorial board 04.10.2017, in the final version – 28.10.2017..

Malyutina Irina A., Southwest State University, 19B Chelyuskintsev St., Kursk, 305004, Russian Federation,
postgraduate, e-mail: Irina92_2010@mail.ru

Kuzmin Aleksandr A., Southwest State University, 19B Chelyuskintsev St., Kursk, 305004, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7980-0673> SCOPUS <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=36142241500>, ResearcherID <http://www.researcherid.com/rid/F-8405-2013>, e-mail: ku3bmin@gmail.com, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=616342

Shatalova Olga V., Southwest State University, 19B Chelyuskintsev St., Kursk, 305004, Russian Federation,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0901-9272>, SCOPUS <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24477712800>, ResearcherID <http://www.researcherid.com/rid/C-3687-2015>, e-mail: shatolg@mail.ru, https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=673680

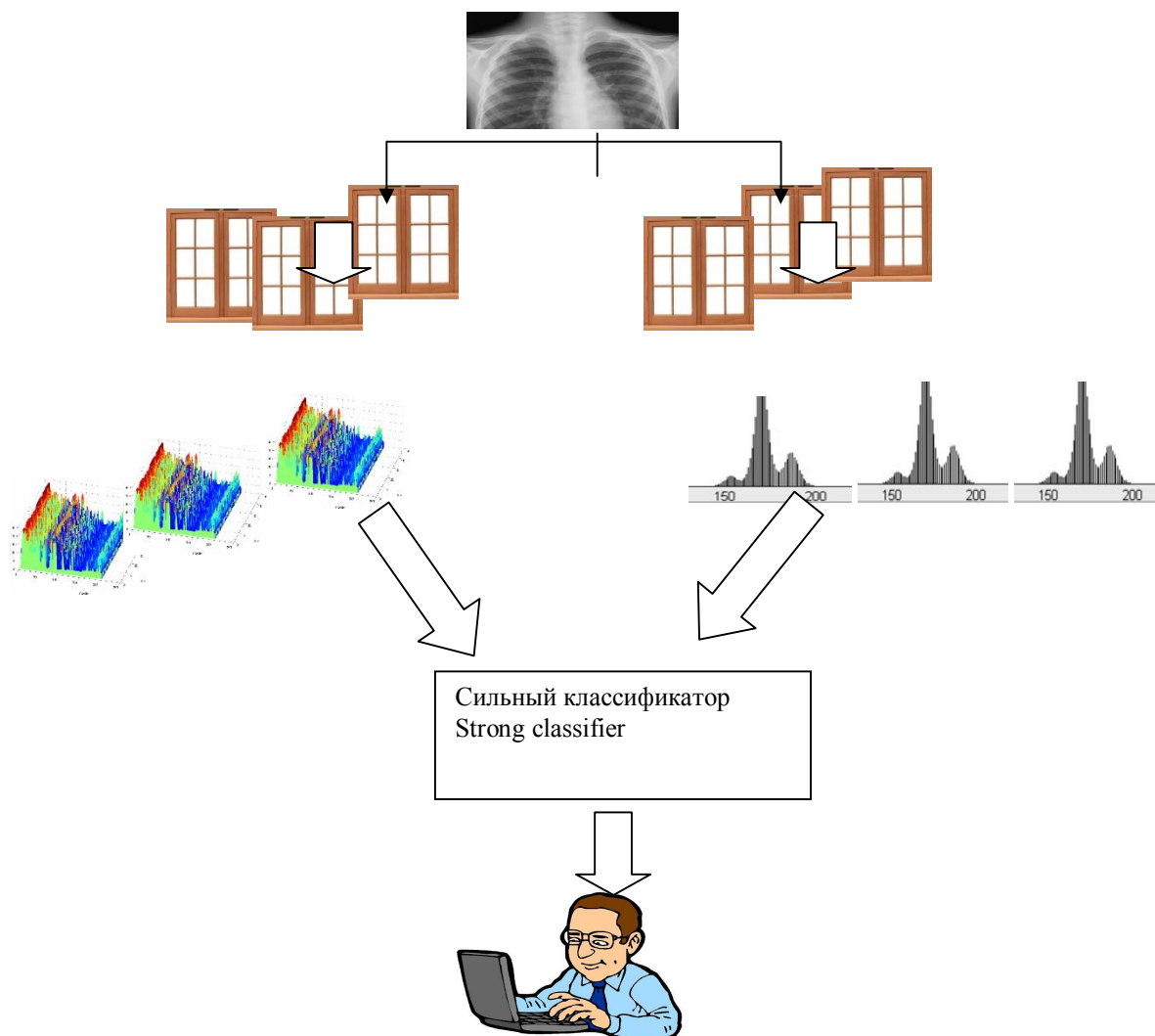
Methods and algorithms for classification of images on chest radiographs based on the analysis of local image windows are proposed. At the first hierarchical level of the analysis, “weak” classifiers are built in local windows based on two approaches to the data analysis. The approach to construct a “weak” classifier by the first method is based on the analysis of amplitude Fourier spectra in a sliding window. The X-ray image is successively scanned by windows of different scale. In each window, the amplitude Fourier spectrum is determined, on the basis of which a “weak” classifier is constructed. It refers

¹Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-07-00164 а.

a fragment of an image in a sliding window to a certain class. The second method of constructing a “weak” classifier is based on the use of descriptors obtained as a result of approximating the brightness histograms in the analysis window. There are as much “weak” classifiers, based on two methods of analysis, as the chosen scales of the analysis windows. At the second hierarchical level of analysis, solutions of “weak” classifiers are combined within each method of the first hierarchical level analysis by building a strong classifier. The final decision “is taken” by the final classifier that aggregates the decisions of two strong classifiers of the second hierarchical level. The advantage of this approach is combination of the advantages of methods based on the analysis of the energy and structural properties of local windows.

Keywords: chest radiograph, classifier, analysis window, brightness histogram, two-dimensional Fourier spectrum, solution aggregator, algorithms, software.

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Обработка медицинских цифровых изображений на протяжении последних десятилетий является объектом пристального внимания исследователей. Множество работ посвящено разработке/использованию математических методов и программных средств в данной области, а также разработке (совершенствованию) аппаратных средств. Интерес исследователей к современным средствам обработки рентгеновских медицинских изображений обусловлен возросшими требованиями к качеству и надежности разрабатываемых диагностических систем [1,3].

Одним из основных направлений применения рентгенографии в медицине человека является получение и анализ изображений грудной клетки. При этом основными целями анализа таких изображений обычно являются выделение (сегментация) приобретенных морфологических образований и отнесение их к известным классам патологий.

Для решения задач распознавания образов по результатам анализа растровых полутоновых изображений необходимо решать задачу разделения исходного изображения на части (сегменты), различающиеся по своему семантическому содержанию. От качества сегментации зависит эффективность дальнейшего анализа и классификации изображений.

Одним из недостатков известных методов сегментации является то, что решение принимается по результатам анализа энергетических свойств изображения, что приводит к неоднозначности решений. Цель работы – разработка методов сегментации рентгенограмм, лишенных этого недостатка.

Метод сегментации изображения на основе локальных спектральных окон. Известен метод сегментации изображения, называемый наращиванием областей [2]. Суть его заключается в том, что элементы изображения с одинаковыми или близкими уровнями яркости группируют, объединяя в однородные области. Для этого на исходном изображении ищут элементарные области, где пиксели объединяются в группы, если они обладают одинаковым уровнем яркости и являются соседями в смысле «четырёхсвязности». Затем элементарные области, имеющие общие границы, сливаются воедино согласно различным эвристическим правилам. Недостатком этого метода является необходимость подбора яркостных порогов в интерактивном режиме.

Известный метод Виолы-Джонса [6] использует принцип двойного или вложенного окна, согласно которому изображение сканируется скользящим окном, каждое положение которого должно быть отнесено к определенному классу. Хотя классифицируется окно (в каждом положении), но к определенному классу относят пиксель, образующий это окно. Например, если по рентгенограмме грудной клетки (РГК) осуществляется диагностика пневмонии, то необходимо принять альтернативное (бинарное) решение: «есть признаки наличия пневмонии» в окне (класс 1) или «нет признаков наличия пневмонии» в окне (класс 2).

Первичное окно в свою очередь сканируется вторичным окном, размеры и форма которого меняются от цикла к циклу сканирования. Этим достигается повышение размерности пространства информативных признаков [4]. Такая процедура приводит к повышению качества классификации, однако значительно увеличивает время, затраченное на принятие решения.

Сущность предлагаемого авторами метода заключается в следующем. Согласно методике Виолы-Джонса, каждый сегмент, соответствующий искомому классу, формируется путем сканирования исходного изображения окном определенного размера $M1 \times M2$. Схема алгоритма такого сканирования, ориентированная на классификацию заболеваний на основе РГК, представлена на рисунке 1.

Решение, принятое на основе алгоритма, представленного на рисунке 1, можно рассматривать как «слабый» классификатор. Меняя размер окна в блоке 2 алгоритма по рисунку 1, посредством этого алгоритма получают множество «слабых» классификаторов. Затем, путем их агрегации получают «сильные» классификаторы [6].

Для автоматической классификации фрагмента изображения, попавшего в окно, а, следовательно, и образующего его пиксели, нами предложено использовать многоэтапную адаптивную фильтрацию в частотной области, которая реализована на основе двумерного дискретного преобразования Фурье (блоки 5 и 6 алгоритма рисунок 1).

Полутоновое изображение РГК сканируется окном $M1 \times M2$. Сканирование реализуется двумя вложенными циклами (блоки 4, 5 на рисунке 1). Яркости пикселей представлены целочисленными отсчетами $x(k1, k2)$ в диапазоне $0 \dots 255$ в прямоугольном окне размером $M1 \times M2$. Отсчеты, попавшие в окно, поступают в блок ДДПФ алгоритма по рис. 1.

Процесс классификации осуществляется в блоке 6. В зависимости от того, какое решение принимается в этом блоке, в блоке 8 бинаризуется пиксель, соответствующий анализируемому локальному окну.

Таким образом, вместо дескрипторов Виолы-Джонса в данном случае используем дескрипторы, полученные в результате ДДПФ – их значительно меньше. Это позволяет устранить один из существенных недостатков метода Виолы-Джонса – очень большое время классификации изображения.

Экспериментальные исследования метода сегментации. Для реализации предложенной методики анализа цифровых биомедицинских изображений, в частности, сегментации рентгенограмм, на кафедре биомедицинской инженерии Юго-Западного государственного университета создано специальное программное обеспечение. Оно позволяет получить набор дескрипторов, предназначенных для построения классификаторов изображений [5,6]. Исходный интерфейс (главное окно) этого программного обеспечения, разработанного в среде MATLAB, представлен на рисунке 2.

Среди многочисленных возможностей данного программного обеспечения - реализация спектральных методов обработки изображений.

Цель работы – получить (создать) инструментальную среду для классификации изображений на основе дескрипторов Фурье. Дескрипторы Фурье определялись из отсчетов оконного двумерного преобразования Фурье на основе выдвинутой концепции построения классификатора РГК.

Согласно этой концепции рентгенограмма грудной клетки сканируется окнами переменного размера. Для каждого размера окна строится свой классификатор, который назовем «слабым» классификатором. Для построения «слабого» классификатора используют дескрипторы, определяемые по гистограмме яркости амплитудного двумерного спектра Фурье [7]. На рис. 3 в качестве примера представлены два оконных ДДПФ фрагмента РГК, полученных в окнах одного и того же размера (в этом примере размер не имеет принципиального значения). Слева показаны соответствующие им фрагменты РГК.

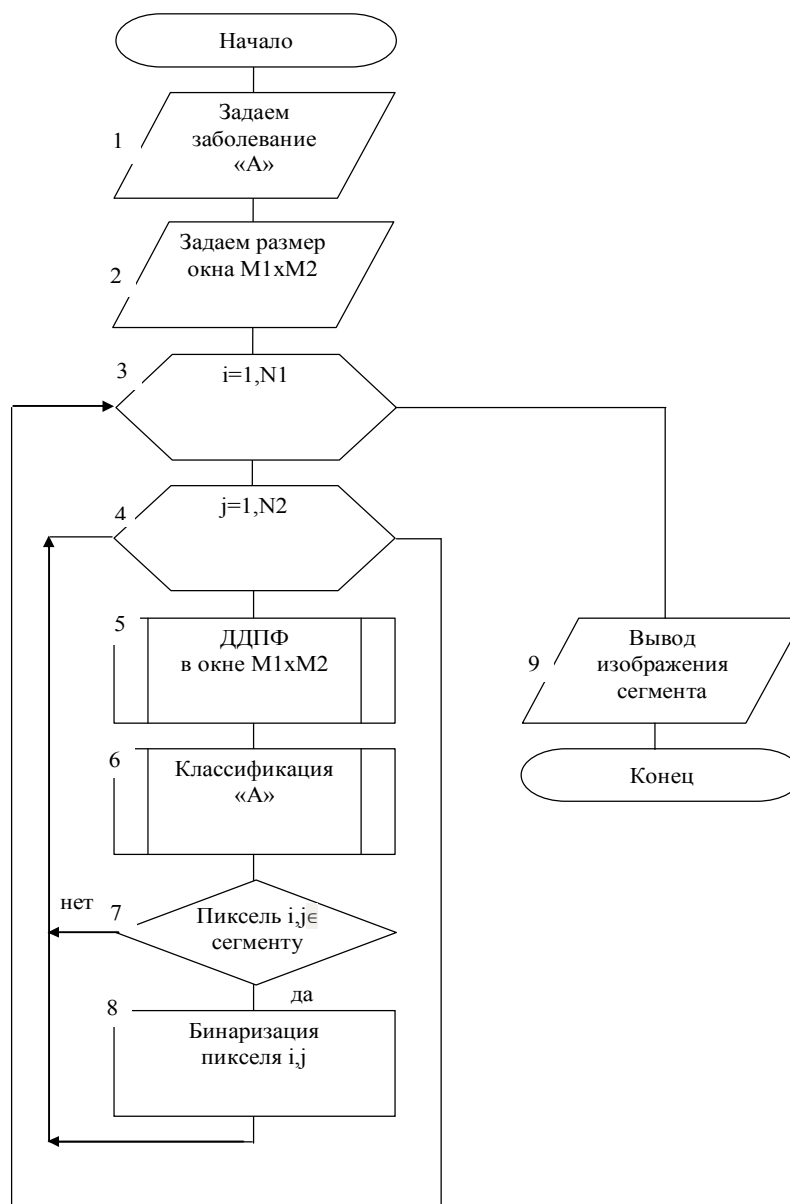


Рисунок 1 – Схема алгоритма сканирования исходного изображения окном размера $M1 \times M2$ двумерного дискретного преобразования Фурье (ДДПФ).

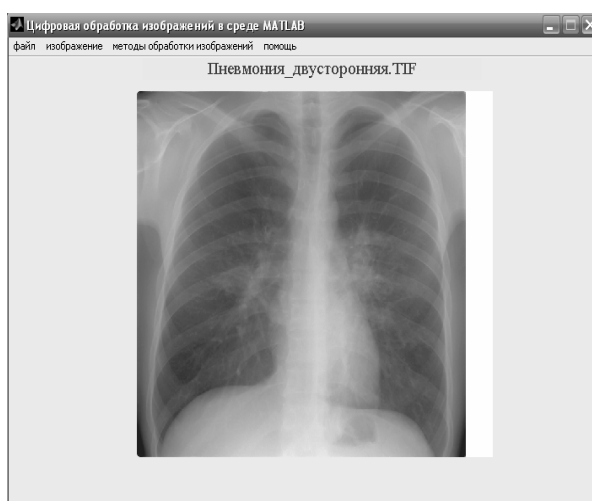


Рисунок 2 – Исходный интерфейс программного обеспечения для обработки биомедицинских изображений в среде MATLAB

Предложенный инструментарий формирования дескрипторов позволяет на основе многооконных ДДПФ строить обучаемые классификаторы для сегментации РГК.

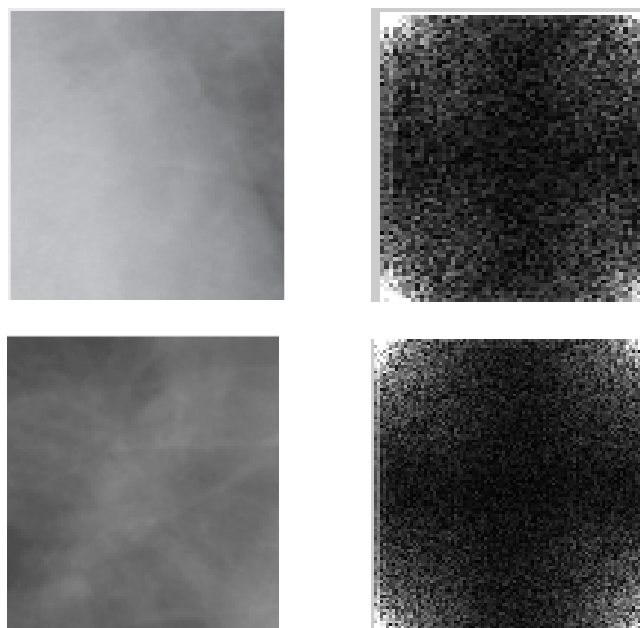


Рисунок 3 – Изображения оконных фрагментов РГК (слева) и их оконные двумерные преобразования Фурье (справа)

Метод сегментации изображения на основе анализа гистограмм яркости в локальном окне.

При исследовании оконных спектров рентгенограмм грудной клетки с морфологическими образованиями, обусловленными пневмонией, были обнаружены эволюции амплитудных спектров Фурье в зависимости от наличия или отсутствия патологии. Эти эволюции могут быть обнаружены посредством «слабых» классификаторов, построенных на основе обучаемых нейронных сетей. В качестве альтернативы дескрипторам Фурье были использованы гистограммы яркости изображения оконного амплитудного спектра Фурье. Примеры таких гистограмм показаны на рис. 4.

Для сравнения, справа показаны гистограммы распределения яркости соответствующих исходных изображений в окне.

Анализ более ста фрагментов изображений, примеры которых представлены на рисунках 3, показал, что форма гистограммы яркости оконных спектров (рисунок 4, слева) более устойчива по сравнению с соответствующими формами, получаемыми у изображений-оригиналов ДДПФ. Это позволило сформировать дескрипторы, по методике, предложенной в [4, 5].



Рисунок 4 – Гистограммы распределения яркости оконных фрагментов рентгенограммы грудной клетки (справа) и гистограммы их оконных двумерных амплитудных преобразований Фурье (слева)

Второй «слабый» классификатор основан на дескрипторах, полученных в результате аппроксимации гистограмм в окне анализа. Для иллюстрации этого метода построения «слабого» классификатора рассмотрим рис. 5. На нем слева показано окно анализа РГК в поле легкого без патологических изменений. Справа на этом же рисунке показана гистограмма распределения яркостей в этом окне.

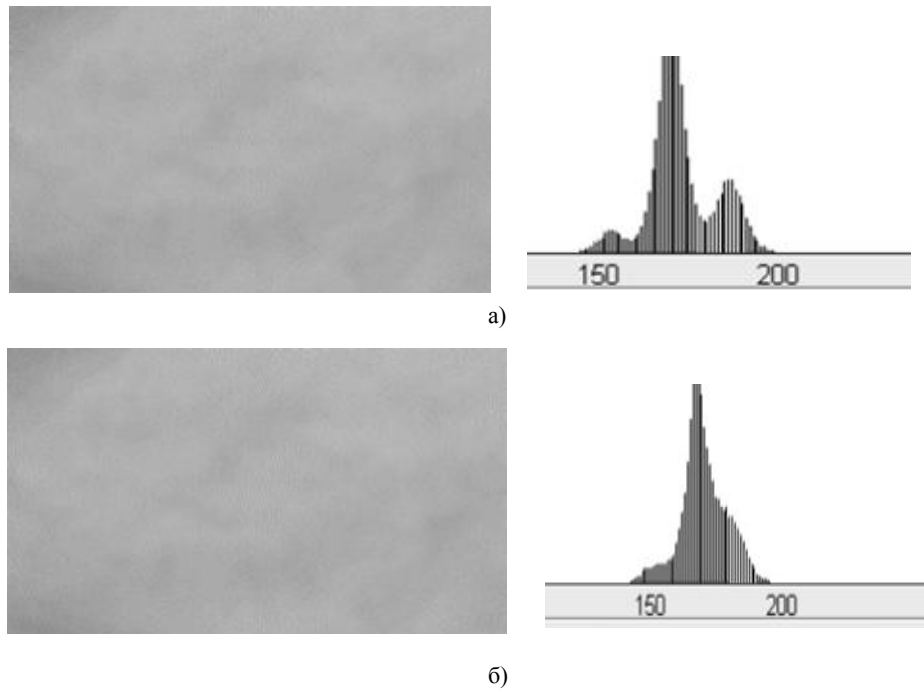


Рисунок 5 – Окна анализа и гистограммы распределения яркости рентгенограммы: – *a*) окно без патологии; *б*) модель окна «с патологией», полученная в результате низкочастотной фильтрации окна без патологии

Анализ гистограмм для изображений с пневмонией (около 100) показал, что при отсутствии патологических изменений в окне анализа, его гистограммы имеют многомодальную форму. На рис. 5б слева показано окно анализа, которое моделирует наличие пневмонии. Для модели пневмонии в окне анализа флюорограммы здорового пациента использовалась низкочастотная фильтрация посредством двумерного преобразования Фурье. При наличии низкочастотной фильтрации исчезает модальность гистограммы яркости и гистограмма приобретает форму, близкую к треугольной. Это позволяет формировать дескрипторы, предназначенные для классификации пневмонии, так как соответствующие этой патологии морфологические образования имеют более низкочастотный спектр по сравнению со спектром фрагментов изображения при отсутствии этого заболевания.

На рисунке 6 показаны окна анализа одного и того же изображения флюорограммы, в котором имеются сегменты, классифицируемые как пневмония.

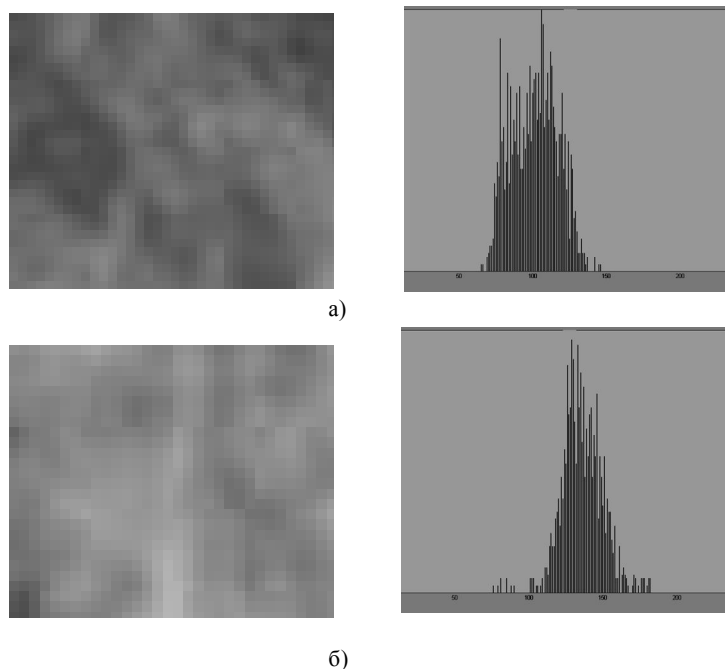


Рисунок 6– Окна анализа и гистограммы яркости рентгенограммы: *a* – окно без патологии; *б* – окно с пневмонией

Статистический анализ аналогичных изображений показал, что и у реальных патологических образований, соответствующих пневмонии, гистограммы яркости в окне анализа приобретают треугольную форму. Поэтому дескрипторы второго классификатора формируются как примитивы, аппроксимирующие гистограммы яркости в окне анализа.

Так как «слабые» классификаторы строятся для каждого размера окна, то для их объединения в «сильные» используются обучаемые нейронные сети прямого распространения [8, 9]. Обучение классификаторов осуществляется для каждой патологии и для каждого размера окна. Таким образом, получаем множество «слабых» классификаторов [10, 11]. Для каждого заболевания выделяют подмножество «слабых» классификаторов, на основе которых строятся сильные классификаторы. «Сильные» классификаторы строятся для каждого метода. Финальный классификатор третьего иерархического уровня объединяет решения «сильных» классификаторов, построенных на основе метода спектрального анализа и метода аппроксимации гистограмм яркости в окне анализа.

Выводы. Для анализа и классификации рентгенограмм грудной клетки разработан трехуровневый классификатор и реализующее его программное обеспечение. Для классификации использовано два метода формирования дескрипторов, которые основаны на обработке изображений рентгенограмм скользящими окнами, различных размеров. Показано, что фрагменты рентгенограмм грудной клетки, попавшие в эти окна и соответствующие заболеванию пневмонией, имеют двумерный спектр Фурье, энергия низкочастотных составляющих которого превышает энергию низкочастотных составляющих фрагментов изображений без патологии. Показано, что формы гистограмм фрагментов рентгенограмм грудной клетки, соответствующие заболеванию пневмонией, имеют отличную форму от гистограмм фрагментов изображений без патологий. Описаны алгоритмы, используемые в разработанном авторами программном обеспечении, реализующем эти методы.

Список литературы

1. Абдулракеб Атеф Рохан Абдусамия. Обзор методов сегментации опухолей на МРТ-изображениях головного мозга/ Абдулракеб Атеф Рохан Абдусамия, Л.Т.Сушкова, Н.А. Лозовская//Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии – 2015. -№1. -С.122-138. ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1\(29\)/122-138.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1(29)/122-138.pdf))
2. Булдаков Н.С. Оценка физической плотности структур при автоматизированной обработке рентгенограмм / Н.С. Булдаков, Т.И. Булдакова, С.И. Суятин // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2017. - №1. - С. 14-22.
3. Дмитриев Г.А. Автоматическое выделение области острого ишемического инсульта на МРТ-изображениях / Г.А. Дмитриев, А.В. Кирсанова, Аль-бахели Васел Ахмед Ахмед // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии – 2014. - №4. -С.166-174. ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4\(28\)/166-174.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4(28)/166-174.pdf))
4. Дюдин М.В. Математические модели для интеллектуальных систем классификации рентгенограмм грудной клетки / М.В. Дюдин, П.С. Кудрявцев, К.В. Подмастерьев и др.// Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. - 2016. - № 2 (19). - С. 94-107.
5. Дюдин М.В. Способ выделения и классификации контуров легких на изображениях флюорограмм грудной клетки / М.В. Дюдин, С.А. Филист, П.С. Кудрявцев// Научные технологии. - 2014. - № 12, т. 15. - С. 25-30.
6. Кудрявцев П.С. Развитие методологии бустинга для классификации флюорограмм грудной клетки/ П.С. Кудрявцев, А.А. Кузьмин, С.А. Филист//Биомедицинская радиоэлектроника, №9, 2016. – С. 10-14.
7. Томакова Р.А. Интеллектуальные технологии сегментации и классификации биомедицинских изображений / Р.А. Томакова, С.Г. Емельянов, С.А. Филист. - Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2012. - 222с.
8. Томакова Р.А. Метод классификации рентгенограмм на основе использования глобальной информации об их структуре/ Р.А. Томакова, М.В. Томаков, И.В. Дураков и др.//Биомедицинская радиоэлектроника. - 2016. - №9. – С.45-51.
9. Томакова Р.А. Универсальные сетевые модели для задач классификации биомедицинских данных / Р.А. Томакова, С.А. Филист, Яа Зар До // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. - № 4(43). - С.44-50.
10. Филист С.А. Нейросетевой решающий модуль для исследования живых систем / С.А. Филист, С.Г. Емельянов, А.Ф. Рыбочкин // Известия Курского государственного технического университета. - 2008. - №2 (23). - С. 77-82.
11. Филист С.А. Автоматические классификаторы сложно структурируемых изображений на основе мультиметодных технологий многокритериального выбора / С.А. Филист, М.В. Дюдин, И.В. Зуев, и др. // Вопросы радиоэлектроники. Серия «Системы и средства отображения информации и управления спецтехникой» (СОИУ), 2015. Выпуск 1. - С.130-140.
12. Филист С.А. Гибридная нейронная сеть с макрослоями для медицинских приложений /С.А. Филист, О.В. Шаталова, М.А. Ефремов // Нейрокомпьютеры. Разработка и применение. - 2014. - №6. - С. 35-39.
13. Binkowska M. The analysis of densitometry image of bone tissue based on computer simulation of X-ray radiation propagation through plate model // Computers in Biology and Medicine. - 2007. – No. 37. - Pp. 245-250.

References

1. Abdulrakeb Atef Rohan Abdulsamia. Survey of methods of segmentation of tumors on mr-images of the brain / Abdulrakeb Atef Rohan Abdulsamia, L.T. Sushkova, N.A. Lozovskaya // Caspian Journal: Management and High Technologies - 2015.-No.1.-Pp.122-138. ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1\(29\)/122-138.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1(29)/122-138.pdf))
2. Buldakov N.S. Otsenka fizicheskoi plotnosti struktur pri avtomatizirovannoi obrabotke rentgenogramm [Assessment of physical density structures with regard to automatic processing of radiographs] / N.S. Buldakov, T.I. Buldakova, S.I. Suyatinov // Biomeditsinskaya radioelektronika [Biomedical radioelectronics]. – 2017. - No. 1. - Pp. 14-22.

3. Dmitriev G.A. Avtomaticheskoe allocation of the acute ischemic stroke in mrt-images / G.A. Dmitriev, A.V. Kirsanova, Al-baheli Vassel Ahmed Ahmed // Caspian Journal: Management and High Technologies - 2014.- №4.- Pp.166-174. ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4\(28\)/166-174.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4(28)/166-174.pdf))
4. Dyudin M.V. Mathematical Models for Intelligent Systems of Chest X-Ray Tissue Classification. Dyudin, P.S. Kudryavtsev, K.V. Apprentices, etc. / Izvestiya South-Western State University. Series Management, Computer Science, Informatics. Medical instrument making. - 2016. - No. 2 (19). - Pp. 94-107.
5. Dyudin M.V. A method for isolating and classifying the contours of the lungs on images of thorax fluorograms / M.V. Dyudin, S.A. Philist, P.S. Kudryavtsev // High technology. - 2014. - No. 12, vol. 15. - Pp. 25-30.
6. Kudryavtsev P.S. Development of boosting methodology for the classification of chest fluorograms / PS Kudryavtsev, A.A. Kuzmin, S.A. Filist // Biomedical radio electronics, №9, 2016. - Pp. 10-14.
7. Tomakova R.A. Intellectual technologies of segmentation and classification of biomedical images / R.A. Tomakova, S.G. Emelyanov, S.A. The Philistine. - Kursk: South-West. state. University, 2012. - 222s.
8. Tomakova R.A. The method of classification of radiographs based on the use of global information on their structure. Tomakov, M.V. Tomakov, I.V. Fools and others. // Biomedical radioelectronics. - 2016. - No. 9. - Pp.45-51.
9. Tomakova R.A. Universal Network Models for Classification of Biomedical Data. Tomakova, S.A. Filist, YaZar Do // News of the South-Western State University. 2012. - No. 4 (43). - P.44-50.
10. Philist S.A. Neural network decision module for living systems research / S.A. Philist, S.G. Emelyanov, A.F. Rybochkin // Proceedings of the Kursk State Technical University. - 2008. - №2 (23). - Pp. 77-82.
11. Philist S.A. Automatic classifiers of complex structured images on the basis of multimethodic technologies of multicriteria choice. Philist, M.V. Dyudin, I.V. Zuev, et al., In Problems of Radioelectronics. Series "Systems and means of information display and control of special equipment" (SOIU), 2015. Issue 1. - Pp.130-140.
12. TPhilist S.A. Hybrid neural network with macro layers for medical applications / S.A. Philist, O.V. Shatalova, M.A. Efremov // Neurocomputers. Development and application. - 2014. - №6. - Pp. 35-39.
13. Binkowskia M. The analysis of densitometry image of bone tissue based on computer simulation of X-ray radiation propagation through plate model // Computers in Biology and Medicine. - 2007. - No. 37. - Pp. 245-250.

РЕДАКЦИОННЫЙ КОММЕНТАРИЙ К СТАТЬЕ

При массовых обследованиях граждан (в т.ч. в рамках диспансеризации населения) актуальна проблема автоматизированного выделения участков изображений на рентгенограммах грудной клетки (РГК), которые с высокой долей вероятности содержат патологии. Кроме того, целесообразна автоматическая классификация этих патологий, наиболее частыми из которых являются онкологические новообразования и пневмонии.

Представленный в статье материал является, конечно, только одним из возможных подходов к автоматизации диагностики патологий на изображениях РГК. Подходы, использованные авторами, описаны в статье достаточно подробно и понятно.

По статье можно сделать следующие замечания и предложения о дополнениях. 1) Математический аппарат в виде формул не представлен, хотя сделаны необходимые ссылки на соответствующие источники. 2) Может быть стоило бы указать в явной форме модели оборудования, на которых были получены РГК. У разных моделей могут быть различные характеристики ПЗС-матриц, в т.ч. и в отношении линейности зависимостей (характеристик) «яркость изображения - интенсивность попавшего на пиксель матрицы излучения». 3) Также целесообразно было бы в явной форме указать, что используемые изображения РГК были «первичными», т.е. не подвергались никаким методам цифровой обработки изображений. 4) Желательно было бы также охарактеризовать контингент лиц, для которых обрабатывались изображения РГК, так как с увеличением возрастов пациентов на РГК могут появляться дополнительные морфологические образования – помехи, например, кальцинат (петрификат).