УДК 004.932

Салмиянов Владислав Олегович
Амурский государственный университет
г. Благовещенск, Россия
E-mail: svsalmiyanov@mail.ru
Масловская Анна Геннадьевна
Амурский государственный университет
г. Благовещенск, Россия
E-mail: maslovskayaag@mail.ru
Salmiyanov Vladislav Olegovich
Amur State University
Blagoveshchensk, Russia
E-mail: svsalmiyanov@mail.ru
Maslovskaya Anna Gennadievna
Amur State University
Blagoveshchensk, Russia
E-mail: maslovskayaag@mail.ru

МУЛЬТИФРАКТАЛЬНАЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ОЦИФРОВАННЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ СНИМКОВ БИОМЕДИЦИНСКИХ ОБЪЕКТОВ

MULTIFRACTAL PARAMETERIZATION OF DIGITIZED X-RAY IMAGES OF BIOMEDICAL OBJECTS

Аннотация. В работе представлены результаты фрактального и мультифрактального анализа цифровых изображений биомедицинских объектов. В ППП Matlab проведена предпроцессорная подготовка снимков и программная реализация методов фрактальной и мультифрактальной параметризации, основанных на покрытии изображений квадратными кластерами. Приведены данные тестовой диагностики растровых изображений, полученных с помощью рентгеновского аппарата.

Abstract. The paper presents the results of fractal and multifractal analysis of digital images of biomedical objects. Preprocessor preparation of images and software implementation of fractal and multifractal parametrization methods based on image coverage by square clusters were performed using the Matlab. The data of test diagnostics of raster images obtained by an X-ray machine are presented.

Ключевые слова: цифровые изображения, рентгеновсие снимки легких, фрактальная размерность, мультифрактальный анализ, спектр Реньи.

Key words: digital imaging, lung x-rays, fractal dimension, multifractal analysis, Renyi spectrum.

DOI: 10.22250/20730268_2023_101_10

Введение

В настоящее время теория самоорганизации и синергетический формализм находят широкое применение в исследованиях сложных естественных нерегулярных структур или абстрактных объектов, сгенерированных на основе рекуррентных алгоритмов. В теории фрактального анализа главная идея – установление свойств объекта в совокупности с масштабными характеристиками. Усовершенствованным методом определения характеристик сложных объектов является применение мультифрактального анализа, в основе которого лежит определение спектра фрактальных характеристик [1, 2, 3].

Фрактальные методы в биологии и медицине – инструмент для количественной оценки степени сложности целого ряда объектов живой природы [4, 5]. Многие системы человеческого организма демонстрируют сложную фрактальную организацию, приобретенную в процессе эволюции: например, легкие человека имеют ветвистую структуру, с различным уровнем сегментарных и подсегментарных частей.

В медицинской практике основная задача применения современных методов интеллектуального анализа – оценка характеристик растровых изображений. Ранняя диагностика патологий основывается на нахождении неявных изменений, устанавливаемых специализированными алгоритмами. Вследствие чего методики фрактального анализа широко применяются в задачах классификации изображений медицинских объектов.

Важным методом биомедицинских исследований, в которых востребован анализ цифровых изображений, является рентгенография органов грудной клетки. В рентгенографии изображение объекта получают на рентгеновской пленке путем ее прямого экспонирования пучком излучения, в цифровой рентгенографии оцифрованный снимок сохраняется на электронном носителе. Рентгенография органов грудной клетки предполагает получение одного или нескольких снимков грудной клетки в различных проекциях, позволяющих оценить наличие и степень патологических изменений в легочной ткани, изменения сердца, сосудов, костного каркаса грудной клетки. При оценке рентгенограмм специалистами всегда присутствуют субъективные факторы, поэтому в диагностической практике все чаще используют дополнительные методы анализа данных, основанные на алгоритмах интеллектуального анализа растровых изображений [6]. Для характеризации структур легких также применяют алгоритмы фрактального анализа [7, 8].

Несмотря на наличие значительного числа отечественных и зарубежных работ по данной научной тематике, полномасштабное и законченное представление об использовании методов фрактального анализа для характеризации биомедицинских объектов на сегодняшний день отсутствует. Настоящее исследование ориентировано на выявление возможностей методов фрактального и мультифрактального анализа для потенциальной диагностики и выявления морфологических особенностей цифровых рентгеновских снимков человеческих легких. В работе представлена реализация предпроцессорной программной обработки изображений и результаты программной реализации методов фрактальной и мультифрактальной параметризации в приложении к исследованию растровых медицинских двумерных объектов. Объектом исследования являются снимки здоровых человеческих легких и снимки легких с патологией.

Математический и алгоритмический аппарат исследования

Метод покрытий: фрактальный анализ

Как было отмечено, в настоящее время активно применяется большое количество фрактальных и мультифрактальных методов для анализа изображений. Ключевым фактором для исследования изображений является специфика наблюдаемого контраста и диапазон масштабных характеристик. В настоящем исследовании методы фрактального и мультифрактального анализа применяются к бинаризированным изображениям, прошедшим предпроцессорную подготовку и покрытым сеточной структурой.

В основе метода «box-counting» лежит процедура многократного разбиения на квадратные кластеры оцифрованного и бинаризированного изображения [3]. Затем подсчитывается количество кластеров *N* с фиксированным размером R_0, содержащих хотя бы один пиксель исследуемого изображения. Следующим шагом является измельчение покрывающей сетки и повторение процедуры с подсчетом кластеров. В завершение строится зависимость в двойном логарифмическом масштабе количества кластеров, содержащих пиксели исследуемого изображения, от общего количества клеток каждого разбиения:

$$N \propto R_0^{-D}. \quad (1)$$

Угловой коэффициент прямой, аппроксимирующей результаты построения зависимости, является значением фрактальной размерности *D*.

Метод мультифрактальной кластерной параметризации

Для сложных структур, которые характеризуются несимметричностью, неоднородностью, нерегулярностью и др., одной фрактальной размерности недостаточно, для полного описания используют набор фрактальных размерностей [1, 3, 9]. Мультифрактальный анализ включает, помимо установления геометрической составляющей, которая определяется фрактальной размерностью, еще и статистические характеристики. Один из классических подходов к оценке мультифрактальных характеристик основан также на методе покрытий. Мультифрактальная параметризация предполагает разбиение квадратными кластерами оцифрованного и бинаризированного изображения, но, помимо оценки заполненности изображения, учитывается и удельный вес кластеров. Алгоритм мультифрактальной параметризации двумерного изображения состоит из последовательности следующих шагов [9, 10].

Шаг 1. Изображение покрывается измельчающей сеткой с размером кластера *l*.

Шаг 2. Создается матрица *C*, где в каждую ячейку $C_{i,j}$ заносятся значения суммарного количества закрашенных точек кластера. Число строк и столбцов матрицы $i, j = \overline{1,k}$, где *k* определяется путем максимального значения пикселей изображения *N*, разделенная на линейный размер кластера *l*.

Шаг 3. Вычисляется удельный вес кластера

$$P_{i,j} = \frac{C_{i,j}}{\sum_{i,j} C_{i,j}}. \quad (2)$$

Шаг 4. Вычисляется мера

$$M_d(q,l) \propto \sum_{i,j=1}^{k} P_{i,j}^q \cdot l^d = N(q,l) \cdot l^d \underset{l\to 0}{\to} \begin{cases} 0, & d > \tau(q), \\ \infty, & d > \tau(q), \end{cases} \tag{3}$$

где q – порядок момента.

Шаг 5. Характеристика удельного веса $P_{i,j}$ изменяется по степенному закону, который зависит от размера кластера l и определяется показателями $\tau(q)$. Значение числа клеток $N(q,l)$ определяется как:

$$N(q,l) = \sum_{i,j=1}^{k} P_{i,j}^q \propto l^{-\tau(q)}, \tag{4}$$

где показатель массы:

$$\tau(q) = -\lim_{l\to 0}\left(\frac{\ln N(q,l)}{\ln l}\right). \tag{5}$$

Шаг 6. Вариация коэффициента деформации q определяет взвешенное число клеток $N(q,l)$ и скейлинговую экспоненту $\tau(q)$.

Набор фрактальных размерностей Реньи $D(q)$ определяется выражением:

$$D(q) = \frac{\tau(q)}{q-1}. \tag{6}$$

Программная реализация алгоритмов проведена в ППП Matlab и протестирована на тестовых объектах с уже известными фрактальными размерностями.

Предпроцессорная обработка медицинских изображений

При обработке медицинских изображений следует учитывать, что они являются проекцией трехмерных структур, – помимо двух декартовых координат, обозначающих положения пикселя в заданном изображении, третьей координатой является яркость пикселя.

В рентгеновском снимке грудной клетки человека нет четкого разделения объектов исследования и объектов, которые не подлежат исследованию. Поэтому важная подзадача – отделение объектов, которые затеняют область на снимке, от самих легких. Предпроцессорные алгоритмы предполагают загрузку исходного изображения, далее на основном снимке выделяется фон, который впоследствии вычитается из исходного изображения. Затем строится пространственная диаграмма, по которой выбирается порог бинаризации.

Мультифрактальный анализ изображений сегментов легких

Для выявления возможностей мультифрактальной параметризации для потенциальной диагностики цифровых изображений структур легких было проведено пробное исследование по оценке скейлинговых характеристик фрагментов изображений легких, полученных с помощью цифрового рентгеновского аппарата. Для испытания было выбрано два снимка легких – здоровое и с патологией, в каждом снимке было выделено по три сегмента правого легкого. На рис. 1 показаны результаты анализа верхних сегментов здорового легкого и легкого с патологией, которые прошли предпроцессорную обработку.

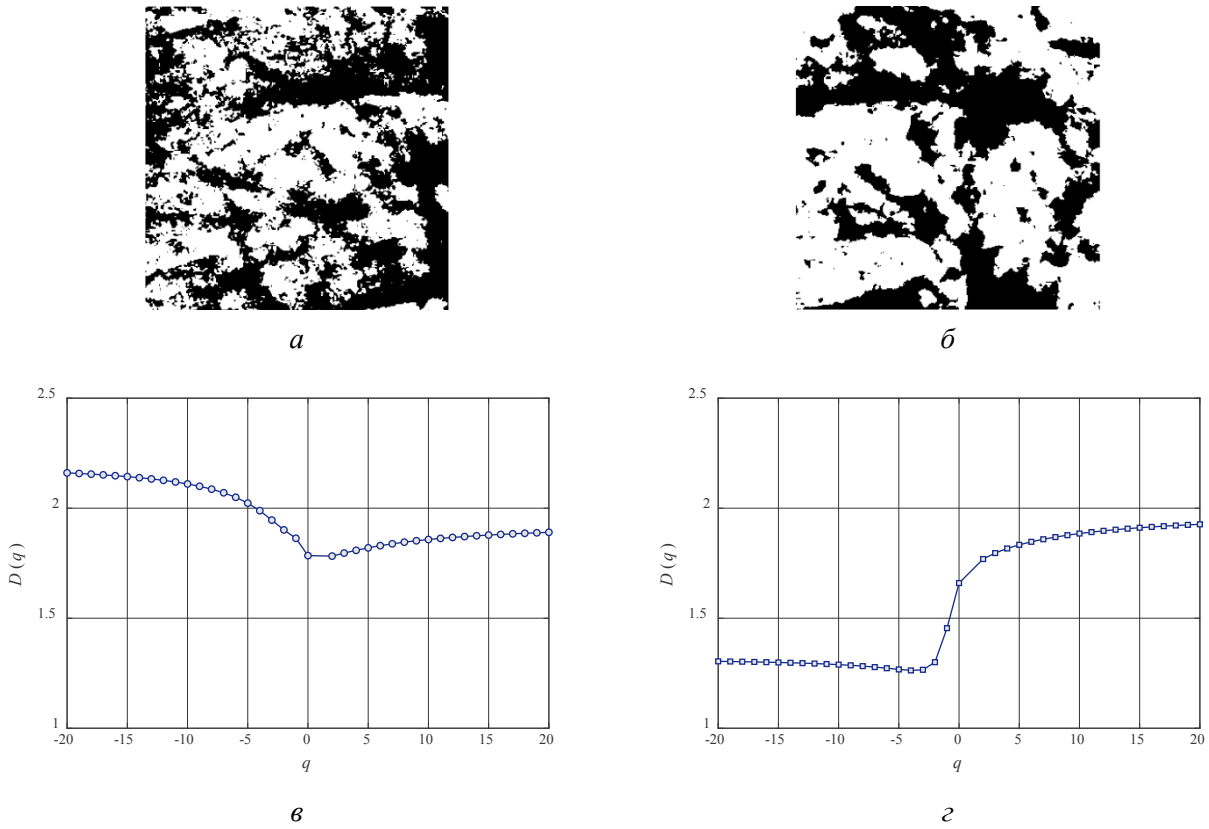


Рис. 1. Результаты мультифрактального анализа: (*в*) для фрагмента легкого, соответствующего норме и изображенного на рисунке (*а*) при D=1.6993; (*г*) – для снимка легкого (*б*) с выявленной патологией при D=1.7667.

Исходя из результатов фрактального анализа «box-counting», можно заключить, что данный подход недостаточно чувствителен, его способности в диагностировании патологий слишком ограничены. Результаты фрактального анализа лежат в узком диапазоне: для здорового легкого фрактальная размерность составляет D=1.69 – 1.72, для легкого с патологией – D=1.74 – 1.77.

Результаты мультифрактального анализа свидетельствуют об уширении наблюдаемого спектра Реньи для снимков с патологией легких по сравнению со снимками легких, соответствующих норме. В случае анализа снимков легких без патологий мы можем говорить о большей тенденции к монофрактальному строению (наблюдаем достаточно узкий спектр). Перспективной в данном направлении представляется и дополнительная методика исследования мультифрактальных характеристик, основанная на вейвлет-преобразованиях [11].

Предпроцессорная обработка полноразмерных изображений

Кроме оценки скейлинговых характеристик по одному установленному уровню яркости, в литературе встречаются работы с использованием интервальных оценок фрактальной размерности для набора яркости полутоновых изображений, здесь используется набор фрактальных размерностей, вычисленных по формуле (1) [5]. Для анализа взяты три изображения здоровых легких и два изображения легких с диагностированной патологией.

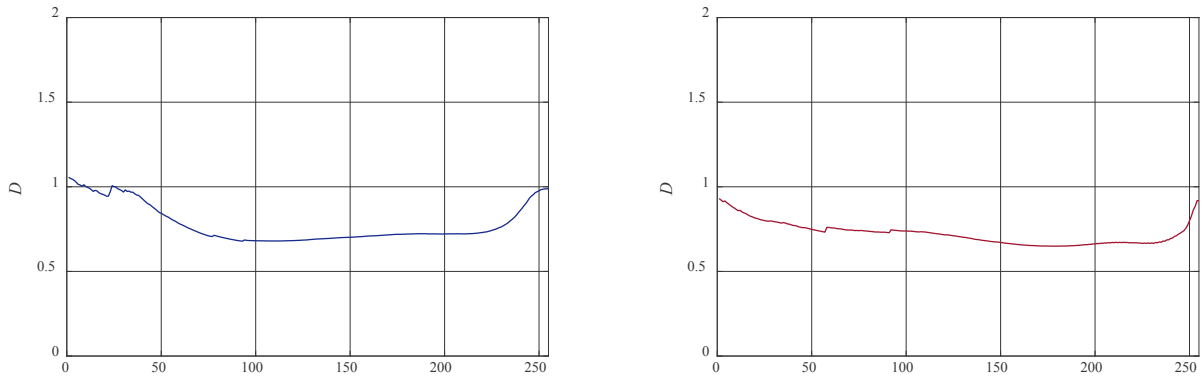
Так как исходное изображение является полутоновым, то нет необходимости выбирать один цветовой диапазон, предпроцессорная подготовка заключается только в выделении области интереса

на снимке. На рис. 2 – легкие, соответствующие норме (а) и выявленной патологии (б). Суть алгоритма оценки фрактальной размерности для индивидуального диапазона яркости состоит в загрузке изображения, определении контуров и лимитировании минимального и максимального значения яркости снимка. Программа рассчитывает фрактальную размерность линий для каждого уровня яркости.

а *б*

Рис. 2. Результат обработки изображений легких: норма – *а*, патология – *б*.

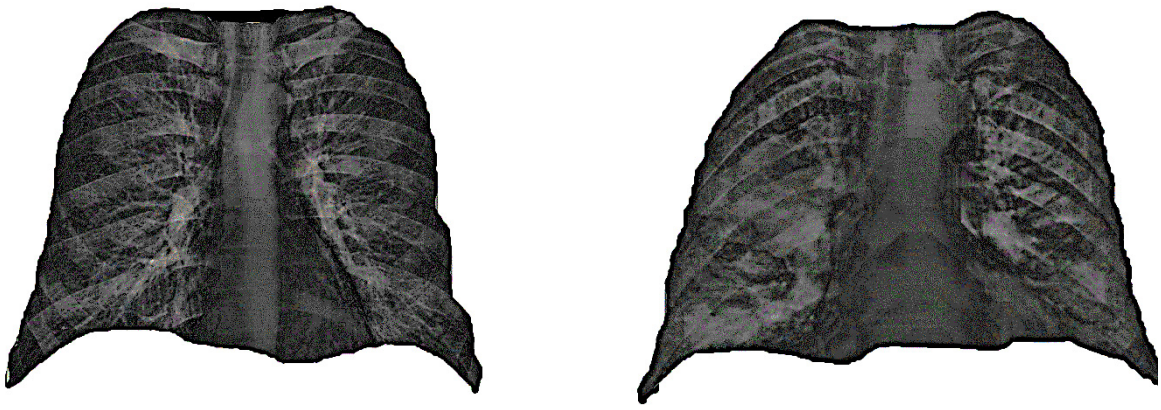
В исследовании был выбран диапазон яркости от 0 до 255 с шагом в один уровень. Результатом анализа является набор фрактальных размерностей линий для каждого уровня яркости (рис. 3). Можно отметить, что для изображения легких, соответствующих норме, есть «светлые» градации серого, при которых размерность линий выделенных контуров соответствует значениям *D*, близким к 1. Для изображения легких с патологией на всех уровнях яркости значение меньше 1.



а *б*

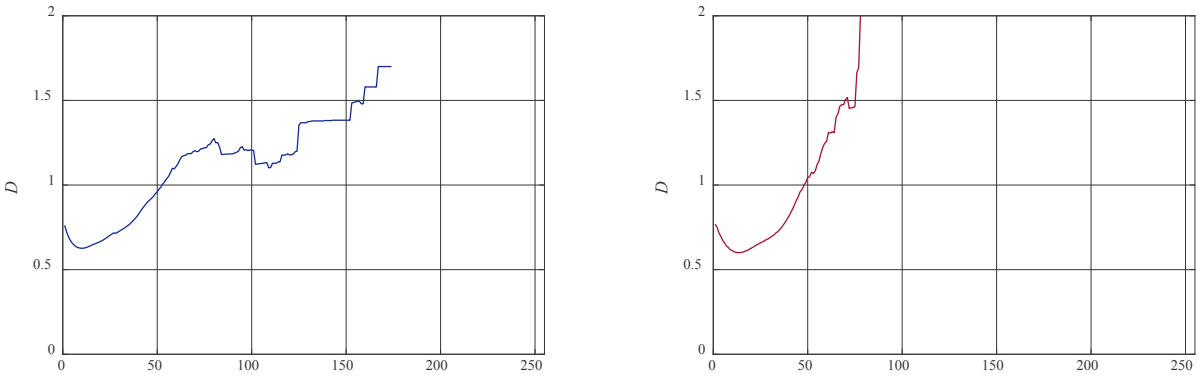
Рис. 3. Набор фрактальных размерностей диапазона яркости для исходных снимков легких: норма – *а*, патология – *б*.

Следующий шаг анализа – объединение методов предпроцессорной обработки, по удалению фона, описанной в предыдущем пункте, с вариацией диапазона яркости. Для оценки фрактальных размерностей были выбраны такие же изображения, но уже прошедшие предпроцессинг по удалению фона (рисунок 4). Затем обработанные снимки прошли процедуру определения набора фрактальных размерностей, установленных по градациям серого для контуров изображений. Результаты представлены на рис. 5.



а *б*

Рис. 4. Результат выполнения предпроцессорной подготовке по удалению фона: здорового легкого – *а*, легкого с патологией – *б*.



а *б*

Рис. 5. Спектр фрактальных размерностей диапазона яркости для обработанных снимков: норма – *а*, патология – *б*.

В результате обработки не все уровни оказались представленными в преобразованном изображении. Можно заключить, что снимкам легких, соответствующим патологии, наблюдается более широкий ряд значений фрактальных размерностей.

Отметим, что выполненный анализ относится к весьма ограниченной выборке данных и не претендует на общность сделанных заключений. Дополнительных исследований, конечно, требует как проверка установленной «чувствительности» методов на репрезентативной выборке, так и применение альтернативных методов анализа (например, использование метода максимумов модулей коэффициентов вейвлет-преобразований [11]).

Заключение

Таким образом, в работе представлены результаты применения методов фрактального и мультифрактального анализа в исследовании скейлинговых характеристик медицинских снимков на примере цифровых рентгеновских снимков легких человека. Разработаны прикладные программы для проведения предпроцессорной подготовки изображений, а также численной оценки фрактальных и мультифрактальных характеристик на основе метода покрытий. Установлено, что классический «box-

counting»-метод имеет очень ограниченные возможности в части классификации и характеризации исходных и обработанных изображений легких, соответствующих норме и патологии. В то же время исследование этой характеристики в диапазонах определенной яркости, а также расчет мультифрактального спектра – более чувствительный подход.

Дальнейшие исследования предполагают вариацию и совершенствование предпроцессорной подготовки растровых изображений, использование альтернативных методов мультифрактальной параметризации и сбор статистических данных анализируемых растровых изображений.

Авторы выражают благодарность Дальневосточному научному центру физиологии и патологии дыхания за предоставленные для анализа биомедицинские изображения.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, проект № 122082400001-8.

1. Falconer, K.J. Fractal geometry: mathematical foundations and applications. // Chichester: John Wilew and Sons, 2014. – 338 p.

2. Jacques, L.V. Introduction to the Multifractal Analysis of Images. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1998. – 52 p.

3. Божокин, С.В., Паршин, Д.А. Фракталы и мультифракталы. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 128 с.

4. Nichita, M.V., Paun, V.P. Fractal analysys in complex arterial network of pulmonary X-Rays images // UPB scientific bulletin, Series A: Applied mathematics and physics. – 2002. – V. 80. – P. 325 – 339.

5. Sztojnov, I., Crisan, A.D., Mina, C.P., Voinea, V. Image processing in biology based on the fractal analysis // [Электронный ресурс] Image Processing – 01.12.2009. – Режим доступа: http://dx.doi.org/10.5772/705.

6. Pilar, O.V., Aldo, R.A. An entropy based measure of complexity: an application in lung-damage // Entropy. – 2022. – V. 24. – P. 1 – 13.

7. Ницын, А.Ю., Поворознюк, А.И., Ницын, Д.А. Приложение фрактального анализа к классификации медицинских изображений // Национальный технический университет (ХПИ), Харьков. – 2007 – С. 135 – 138.

8. Степанов, В.А. Автоматизированная система для скрининговой диагностики туберкулеза легких на основе анализа фрактальных объектов // ИжГТУ – 2013 – С. 1-20.

9. Хмелевская, В.С., Хмелевская, В.С., Бондаренко, В.В. Компьютерный анализ процессов самоорганизации в металлических материалах // Математическое моделирование. – 2006. – Т. 18. – № 1. – С. 88–98.

10. Барабаш, Т.К., Масловская, А.Г. Фрактальные закономерности и модельные представления процессов переключения поляризации сегнетоэлектриков при диагностике методами растровой электронной микроскопии. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2016. – 148 с.

11. Масловская, А.Г., Афанасов, Л.С. Алгоритмы мультифрактального вейвлет-анализа в задачах спецификации растровых изображений самоподобных структур // Вестник Томского государственного университета. «Управление, вычислительная техника и информатика». – 2020. – Т. 53. – С. 61 – 70.