

**ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА К
МЕДИЦИНСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ**

Туракулов Шохрух Худаярович

Докторант кафедры “Компьютерные системы”

Ташкентского Университета Информационных

Технологий имени Мухаммада ал – Хоразмий, Ташкент, Узбекистан

Сохибова Холида Давроновна - магистрант

II курса Ташкентского Университета Информационных Технологий имени

Мухаммада ал – Хоразмий, Ташкент, Узбекистан

1. Абстракт

В данной работе рассматривается применение метода подсчета коробок к медицинским изображениям для анализа сложности и нерегулярности структур в биомедицинских объектах. Методы фрактального анализа, основанные на методе подсчета ящичков, широко используются для задачи классификации изображений медицинских объектов, позволяя оценить фрактальную размерность изучаемой структуры. Процедура мультиплексирования на квадратные кластеры и подсчета количества кластеров заданного размера позволяет выявлять патологии, такие как опухоли, и определять фрактальные размеры, важные для характеристики здоровых и больных тканей. Результаты мультифрактального анализа, проведенного на медицинских изображениях, демонстрируют важность и эффективность методов подсчета клеток в диагностике и исследовании биомедицинских структур.

2. Введение

В 1970-х годах Бенуа Б. Мандельброт представил формальный подход к анализу фрактальных явлений и указал, что фрактальная геометрия окружает нас повсюду [1,2]. Фрактальная геометрия встречается в траекториях частиц, гидродинамических потоках, волнах, ландшафтах, горах, островах, реках, скалах, металлах, композитных материалах, растениях, полимерах, гелях и т.д. [2]. В последние годы он применяется не только "для понимания фракталов и анализа их применения в различных областях науки" [3,4], но и в медицине, где анализируются биологические изображения [5-7].

Фрактальный анализ становится все более популярным в различных областях естественных и биологических наук, например, в материаловедении [8] и нейронных науках [8,9,10,11]. Различные сложные системы проявляют фрактальные свойства (например, самоподобие и способность заполнять пространство) в ограниченном диапазоне пространственных масштабов.

Например, организмы и ткани неправильной формы лучше характеризуются фрактальной размерностью (FD) по сравнению с обычной, основанной на евклидовой геометрии. Фрактальная геометрия характерна для морфологии тканей, сосудистых узоров вокруг опухолевых клеток [16,17], структур мозга [8,9] и костей [20,21], белковых агрегатов [22] и т.д. Не все эти системы являются "настоящими" геометрическими фракталами. Это связано с тем, что они не масштабируются до бесконечности, а, наоборот, масштабируются на многих биологически значимых уровнях. В этих системах неправильные формы, самоподобие и нецелые размеры описываются со статистической точки зрения. ФД использовался для количественного анализа сложности формы во многих биомедицинских приложениях, включая магнитно-резонансную томографию (МРТ) и компьютерную томографию [17], поскольку единицы, составляющие мотив, скорее похожи, чем идентичны целому, и их повторение ограничено определенным пространственным окном масштабирования. Этот метод был использован в работах [8,9,13,14,15,16,18,19,20,21]. В мозге человека фрактальный анализ использовался для выявления структурных изменений в белом веществе (БВ) [4,20,21] и сером веществе (СВ) [11] при различных клинических состояниях [8,9,13].

Во фрактальном анализе существует несколько различных методов вычисления ФД объекта на плоскости, все они могут быть сведены к двум основным подходам: метод, связанный с длиной, и метод, связанный с массой [25]. Использование других методов приводит к трудностям при сравнении результатов, так как каждый метод дает немного разные результаты при анализе одной и той же структуры [24]. Поскольку традиционные методы калибровки часто отнимают много времени, необходимы другие практические методы. Одним из таких методов является традиционный метод подсчета клеток (ВС-метод), который основан на концепции "покрытия" изображения прямоугольной сеткой координат. Этот метод не подходит для измерения длины, а также других характеристик детали, но является лучшим методом для оценки FD. Поэтому метод ВС широко используется среди других фрактальных методов [24].

3. Материалы и методы

Один из методов фрактального анализа, метод подсчета сегментов [5], является надежным и трудоемким [7]. Поэтому требуются более простые методы, и метод подсчета квадратов [3] кажется подходящим для измерения фрактальной размерности реальных объектов [2, 3, 5, 12]. Поскольку эта область объединяется с эквивалентной сетью квадратов [14], она очень похожа (или иногда равна) на идею традиционного исчисления, согласно которой следует измерять "площадь плоской области" в пределах любой замкнутой нерегулярной границы [13].

Традиционный метод подсчета квадратов "покрывает" объект прямоугольной сеткой координат [H] и подсчитывает количество квадратов [2]. Поскольку каждый набор квадратов характеризуется квадратной гранью g , соответствующее количество квадратов (N), необходимое для покрытия формы, выражается как функция от Фрактальная размерность (например, размер квадратов) определяется как наклон логарифмической зависимости между N и g . С математической точки зрения размеры нижней и верхней граней подмножества определяются соответственно следующим образом

$$\underline{\dim}_B(F) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log N_\delta(F)}{-\log \delta} \quad (1)$$

$$\overline{\dim}_B(F) = \overline{\lim}_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log N_\delta}{-\log \delta} \quad (2)$$

Если нижний и верхний пределы равны, то общий размер контрполя называется F. Эта величина называется размером F поля счетчика и обозначается:

$$\dim_B \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log N_\delta(F)}{-\log \delta} \quad (3)$$

где $N_\delta(F)$ может быть наименьшим числом кубов стороны δ (естественно, в 3D), что охватывает F или наибольшее количество δ с центрами в F. Когда метод ВС применяется к оцифрованным изображениям, он охватывает изображение с сеткой квадратных ячеек (с размером ячейки r), где размер ячейки выражается как число пикселей. Количество квадратов $N(r)$, необходимых для покрытия изображения по закону власти

$$N(r) = const * r^{-DB}$$

где DB - размерность ящика (BD в дальнейшем тексте), полученная как абсолютное значение наклона логарифмической зависимости между $N(r)$ и r .

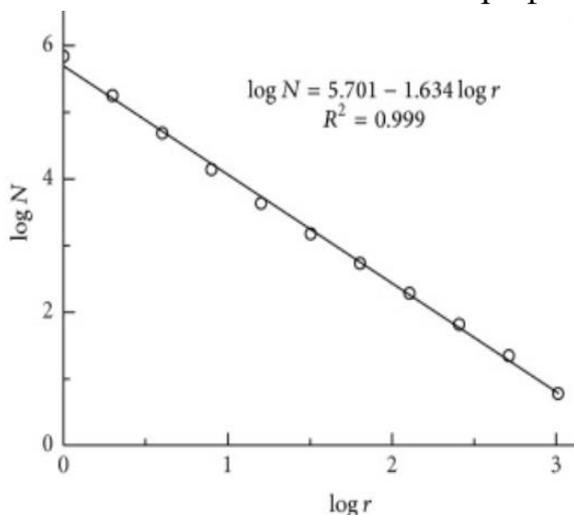


Рис 1. Логарифмическая зависимость между числом квадратов (N) и размером квадрата (r) представлен прямой линией.

Метод подсчета коробок помогает идентифицировать опухоли мозга на медицинских изображениях, предоставляя количественный подход к анализу сложности и нерегулярности структур на изображении. В этом методе изображение делится на сетки заданного размера и подсчитывается количество ящиков, необходимых для охвата опухолевой структуры. Фрактальная размерность рассчитывается путем анализа зависимости между количеством ячеек и их размером. Фрактальная размерность, полученная с помощью метода подсчета клеток, помогает отличить нормальную ткань мозга от опухолевых участков в зависимости от сложности и неоднородности их структуры. Этот количественный анализ позволяет обнаружить тонкие изменения в структуре ткани, что может помочь выявить и охарактеризовать опухоли мозга на медицинских изображениях.

Магнитно-резонансная томография (МРТ) мозга является кандидатом на определение характеристик с помощью фрактального анализа из-за его очень сложной структуры. Команда исследователей проанализировала фрактальную размерность (FD) контуров типичных опухолевых клеток мозга в культуре, как кинетически, так и морфологически. Для измерения контуров опухолевых клеток они использовали метод одномерного подсчета коробок. Они предложили три новых алгоритма анализа фрактальной размерности (FD), такие как сегментарный пороговый метод подсчета клеток (PTBC), сегментарный модифицированный метод подсчета клеток (PMBC) и сегментарный метод триангуляции площади поверхности (PTPSA), для обнаружения опухолей на 2D и 3D пространственных МР-изображениях мозга.

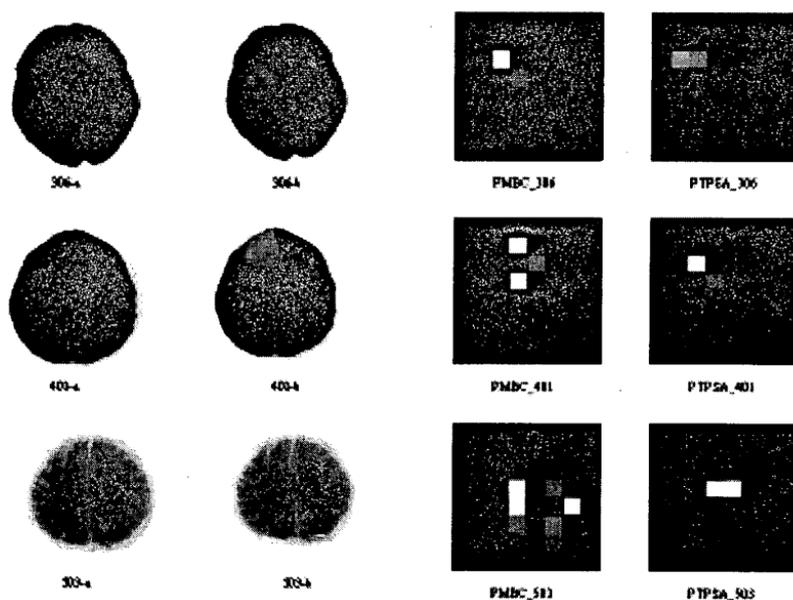


Рис 2. Иллюстрация расположения опухоли и различий в FD между ответными МР-изображениями, полученными с помощью алгоритмов PMBC и FTPSA алгоритмов.

При разработке алгоритмов PTBC, PMBC и PTPSA за основу был взят

алгоритм ВС, широко распространенный метод оценки: Метод РТВС использует кумулятивную гистограмму и информацию о ФД с различными порогами, а методы РТВС и РТПСА - вычисление ФД по частям. Метод ВС, который оценивает фрактальную размерность одномерного изображения, дает хорошие результаты, как и ожидалось. Однако он не подходит для изображений с грубыми поверхностями в двух и более измерениях, таких как облака или МРТ; метод РТВС позволяет обнаружить опухоли на МРТ-изображениях, но определить точное местоположение опухоли сложно. Кроме того, изменение FD при каждом пороге незначительно. На рис. 1 и 2 показана разница в результатах FD при использовании алгоритмов РМВС и РТПСА для пары МР-изображений, соответственно; разница в FD четко показывает расположение опухоли на соответствующем изображении. Таким образом, методы РМВС и РТПСА позволяют точно обнаруживать и локализовать опухоли на МР-изображениях головного мозга; при сравнении методов РМВС и РТПСА алгоритм РМВС дает лучшие результаты в обнаружении и локализации опухолей благодаря своей более высокой чувствительности. Следует отметить, что при декомпозиции изображения сохраняется фрактальная структура опухоли. Кроме того, формулировка кумулятивной гистограммы в РТВС вносит свой вклад в нефрактальную обработку МР-изображений и поэтому может ухудшить эффективность данного метода.

4. Заключение

Благодаря использованию метода подсчёта клеток (box counting method), который применяется к медицинским изображениям, можно провести анализ сложности и неравномерности структуры в биомедицинских объектах. Этот метод позволяет оценить фрактальную размерность исследуемых структур, что имеет важное значение для диагностики различных медицинских состояний, включая опухоли и патологии. Использование метода подсчета клеток открывает новые перспективы для выявления тонких изменений в тканевых узорах, что способствует более точной и ранней диагностике заболеваний. Анализируя фрактальную размерность клеток на медицинских изображениях, можно обнаружить сложные паттерны и структуры, которые трудно выявить с помощью других методов анализа изображений. Таким образом, методы подсчета клеток являются важным инструментом для медицинских диагностических исследований, углубляя понимание биомедицинских процессов и способствуя совершенствованию диагностических и терапевтических подходов к различным заболеваниям.

Литература:

- B. B. Mandelbrot, "The Fractal Geometry of Nature," W.H. Freeman and Co., New York, 1982.
- [2] J-F. Gouyet, "Physics and Fractal Structures," Springer, 1996.
- [3] K. Falconer, "Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications", John Wiley & Sons, New York, 1990.
- [4] M. F. Barnsley, "Fractals Everywhere", Dover Publications, Inc., Mineola, New York, 2012.
- B. B. Mandelbrot, "The Fractal Geometry of Nature," W.H. Freeman and Co., New York, 1982.
- [2] J-F. Gouyet, "Physics and Fractal Structures," Springer, 1996.
- [3] K. Falconer, "Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications", John Wiley & Sons, New York, 1990.
- [4] M. F. Barnsley, "Fractals Everywhere", Dover Publications, Inc., Mineola, New York, 2012.
- B. B. Mandelbrot, "The Fractal Geometry of Nature," W.H. Freeman and Co., New York, 1982.
- [2] J-F. Gouyet, "Physics and Fractal Structures," Springer, 1996.
- [3] K. Falconer, "Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications", John Wiley & Sons, New York, 1990.
- [4] M. F. Barnsley, "Fractals Everywhere", Dover Publications, Inc., Mineola, New York, 2012.
- B. B. Mandelbrot, "The Fractal Geometry of Nature," W.H. Freeman and Co., New York, 1982.
- [2] J-F. Gouyet, "Physics and Fractal Structures," Springer, 1996.
- [3] K. Falconer, "Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications", John Wiley & Sons, New York, 1990.
- [4] M. F. Barnsley, "Fractals Everywhere", Dover Publications, Inc., Mineola, New York, 2012.
- [1] В. Б. Мандельброт, "Геометрия фрактала Природы", В.Х. Фримен и Ко., Нью-Йорк, 1982.
- [2] J-F. Gouyet, "Физика и фрактальные структуры", Springer, 1996.
- [3] К. Фальконер, "Фрактальная геометрия: математические основы и Заявления", John Wiley & Sons, Нью-Йорк, 1990.
- [4] М. Ф. Барнсли, "Фракталы везде", Дуврские публикации, инк., Минеола, Нью-Йорк, 2012.
- [5] Р. В. Гленни, Х. Т. Робертсон, С. Ямасиро и Ж. Б. Bassingthwaighte, "Фрактальный анализ в медицине", Физиология, 70(6), pp 2351-2367, 1991.

- [6] Н. Райкович, Б. Крстоношич и Н. Милошевич, "Метод подсчета по ячейкам двухмерное нейронное изображение: модификация метода и количественная Анализ изображений обезьяны и человека Мозг," Вычислительные и математические методы в медицине, Hindavi, 2017:8967902, pp 1-9, 2017.
- [7] К. К. Чен, Й. С. Дапонтте, М. Д. Фокс, "Анализ фракталов и классификация в медицинской визуализации," IEEE Транзакции на медицинских Imaging, IEEE, 8(2), pp133-142, 1989
- [8] Фратини, М.; Почча, Н.; Риччи, А.; Кампи, Г.; Бургхаммер, М.; Аэпли, Г.; Бьянкони А. Безокалиберная структурная организация кислородных промежуточных уздечек в $\text{La}_2\text{CuO}_4+y$. Nature 2010, 466, 841–844.
- [9] Эстебан, Ф.Дж.; Гробница, Дж.; de Mendizabal, N.V.; Гони, Дж.; Навас, Дж.; де Мирас, Дж.Р.; Бехарано, Б.; Масдеу, Дж.К.; Виллослада. Фрактальная размерность и изменения белого вещества при рассеянном склерозе. NeuroImage 2007, 36, 543–549.
- [10] Эстебан, Ф.Дж.; Гробница, Дж.; де Мирас, Дж.Р.; Навас, Дж.; de Mendizabal, N.V.; Гони, Дж.; Кесада, Х.М.; Бехарано, Б.; Виллослада. Фрактальный размерный анализ серого вещества при рассеянном склерозе. J. Neurolog. Sci. 2009, 282, 67–71.
- [11] Фри, С.Л.; Сисодия, С.М.; Кук, М.Дж.; Фиш, Д.Р.; Шорвон С.Д. Трехмерный фрактальный анализ поверхности белого вещества по магнитно-резонансным изображениям мозга человека. Цереб. Cortex 1996, 6, 830–836.
- [12] Лю, Дж.З.; Чжан, Л.Д.; Юэ Г.Х. Фрактальная размерность в мозжечке человека, измеренная с помощью магнитно-резонансной томографии. Biophys. J. 2003, 85, 4041–4046.
- [13] Маджумдар, С.; Прасад Р.Р. Фрактальная размерность церебральных поверхностей с использованием магнитно-резонансных изображений. Вычислительная техника. 1988, 2.
- [14] Санду А.Л.; Расмуссен И.А.; Лундервольд, А.; Кройдер, Ф.; Neckelmann, G.; Хугдаль, К.; Шпехт К. Фрактальный размерный анализ МР-изображений выявляет нарушения структуры серого вещества при шизофрении. Компьютер. Мед. График визуализации. 2008, 32, 150–158.
- [15] Чжан, Л.; Дин, Д.; Лю, Дж.З.; Сахгал, В.; Ван, Х.Ф.; Юэ Г.Х. Количественная оценка дегенерации белого вещества при нормальном старении с использованием фрактальной размерности. Нейробиол. Выдержка 2007, 28, 1543–1555.
- [16] Ди Иева, А.; Эстебан, Ф.Дж.; Грицци, Ф.; Клоновски, В.; Мартин-Ландрове, М. Фракталы в нейронауках, часть II: клиническое применение и будущие перспективы. Нейробиолог 2013, 21, 30–43
- [17] Ди Иева, А.; Грицци, Ф.; Елинек, Х.; Pellionisz, A.J.; Лоса Г.А. Фракталы в нейронауках, Часть I: Общие принципы и основы нейронаук. Нейробиолог 2013, 20, 403–417.
- [18] Ланг, С.; Мюллер, Б.; Dominiotto, M.; Кэттин,.; Занетт, И.; Вайткамп, Т.; Хибер С. Трехмерная количественная оценка капиллярных сетей в здоровых и раковых тканях двух мышей. Микроваск. 2012, 84, 314–322.
- [19] Риссер, Л.; Плурабуэ, Ф.; Штайер, А.; Cloetens, P.; Ле Дюк, Г.; Фонта, К. От

- гомогенных до фрактальных нормальных и опухолевых микрососудистых сетей в головном мозге. *J. Cereb. Кровоток Метаб.* 2007, 27, 293–303.
- [20] Уллоа Северино, Ф.; Бан, Дж.; Сонг, К.; Танг, М.; Бьянкони, Г.; Чэн, Г.; Торре, В. Роль размерности в динамике нейронных сетей. *наук*, 2016, 6, 29640.
- [21] Маватары, Т.; Миура, Х.; Хигаки, Х.; Курата, К.; Моро-Ока, Т.; Мураками, Т.; Ивамото Ю. Количественный анализ трехмерной сложности и изменений связности трабекулярной микроархитектуры в связи со старением, менопаузой и воспалением. *J. Orthop. Sci.* 1999, 4, 431–438.
- [22] Кампи, Г.; Пеццотти, Г.; Фратини, М.; Риччи, А.; Бургхаммер, М.; Канседда, Р.; Мастроджакомо, М.; Букреева И.; Седола А. Визуализация регенерирующей костной ткани на основе нейронных сетей, применяемых к микродифракционным измерениям. *Appl. Phys. Lett.* 2013, 103, 253703.
- [23] Де Спирито, М.; Брунелли, Р.; Мэй, Г.; Бертани, Ф.Р.; Ciasca, G.; Греко, Г.; Папи, М.; Арковито, Г.; Урсини, Ф.; Парасасси Т. Липопротеины низкой плотности, стареющие в плазме, образуют кластеры, напоминающие субэндотелиальные капли: агрегация через поверхностные сайты. *Biophys. J.* 2006, 90, 4239–4247.
- [24] E. Fernández и H. F. Jelinek, "Использование фрактальной теории в нейробиологии: методы, преимущества и потенциальные проблемы," *Методы*, vol. 24, no. 4, pp. 309-321, 2001.
- [25] Т. Г. Смит мл., Г. Д. Ланге и В. Б. Маркс, "Фрактальные методы и результаты в клеточной морфологии - размерности, лакунность и мультитракции", журнал нейронаучных методов, vol. 69, no. 2, pp. 123-136, 1996.
- [26] А. Ди Иева, Ф. Й. Эстебан, Ф. Грицци, В. Клоновски и М. Мартин-Ландроув, "Фракталы в нейробиологии, часть II: клиническое применение и перспективы будущего," *Нейробиолог*, ст. 21, ст. 1, с. 30-43, 2015.