

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТУРОВ ШАРОВИДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ЛЕГКИХ

И. В. Молодкин^{1,2}, А. М. Шайдук^{1,3}, С. А. Останин^{1,4}, В. К. Коновалов³,
С. Л. Леонов⁵, О. В. Борисенко³

¹Алтайский государственный университет, 656049, Барнаул, Россия
E-mail: tian.08@mail.ru

²Алтайский краевой онкологический диспансер, 656049, Барнаул, Россия

³Алтайский государственный медицинский университет, 656038, Барнаул, Россия

⁴ООО „Алтайский геофизический завод“, 656011, Барнаул, Россия

⁵Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, 656038, Барнаул, Россия

Проанализирован двумерный массив денситометрических показателей, полученный при обработке томографических медицинских изображений пациентов с верифицированными диагнозами заболеваний легких (рак и туберкулез). Исследована возможность использования в целях дифференциальной диагностики заболеваний информации о свойствах контуров изображений шаровидных образований легких. Применена методика построения контуров изображений таких образований. Для описания контура рассчитан условный центр масс изображения патологии и получены две одномерные функции-сигнатуры: модуля радиуса-вектора, проведенного из центра изображения шаровидного образования к его границе, а также полярного угла поворота радиуса-вектора. Аргументом обеих функций является условный номер пиксела, принадлежащего контуру. С помощью спектрального анализа функции-сигнатуры рассчитаны такие характеристики контуров, как спектральная энтропия, мультиплетность, количество локальных максимумов, функции-сигнатуры полярного угла поворота радиуса-вектора. Проведен анализ статистической значимости отличий величин этих характеристик контуров шаровидных образований при различных заболеваниях (рак и туберкулез). Показаны статистические различия некоторых характеристик контура, что может позволить осуществлять дифференциальную диагностику заболеваний легких.

Ключевые слова: компьютерная томография, медицинские изображения, контур шаровидного образования легких, дифференциальная диагностика, спектральный анализ, рак, туберкулез

Введение. Обычно медицинские изображения описываются диагностом качественно, а потому не всегда однозначно. Врач-рентгенолог, рассматривая изображения, анализирует их особенности, опираясь на диагностический опыт, который лишь в малой степени подкреплён объективными количественными характеристиками изображения [1—4].

Основная количественная характеристика, получаемая при проведении компьютерной томографии — это числа Хаунсфилда, принадлежащие определенным вокселям. Программы обработки изображения выдают значения денситометрического показателя для заданной области и их статистические характеристики (обычно среднее значение и стандартное отклонение). Для постановки правильного диагноза последних двух характеристик, как правило, недостаточно. В большинстве случаев невозможно поставить верный диагноз, основываясь лишь на какой-то одной статистической характеристике совокупности чисел Хаунсфилда (денситометрический показатель) для медицинского изображения [5—7].

Кроме денситометрических характеристик выделенной области врач-рентгенолог уделяет большое внимание контуру изображения шаровидного образования легкого (ШОЛ).

По внешнему виду их разделяют на „гладкие“, „фестончатые“, „бугристые“ и др. [8, 9]. Из этого можно заключить, что характерный вид контура ШОЛ воспринимается врачом-рентгенологом как диагностический параметр, но оценивается субъективно. Необходимо ввести количественные характеристики контура и оценить их зависимость от типа заболеваний. Только в таком случае появится возможность использовать эту характеристику в дифференциальной диагностике с использованием систем поддержки принятия решений.

В работе рассчитаны количественные характеристики контуров изображения области интересов для пациентов с верифицированными диагнозами и выполнен статистический анализ зависимости этих характеристик от вида заболевания. Это позволит применять полученные характеристики для автоматизированной дифференциации типа патологии в легком с более точной постановкой диагноза.

Материалы и методы. Для исследования была создана база данных пациентов с диагнозами „рак легкого“ и „туберкулез“. Диагноз больных был подтвержден специалистами КГБУЗ „Диагностический центр Алтайского края“. Диагноз „рак легких“ подтверждался гистологическим исследованием, а „туберкулез“ — посевом мокроты из легких.

Сканирование пациентов проходило на компьютерном томографе Asteion 4 (Toshiba Medical Systems). Шаг сканирования — 2,0 мм, напряжение и ток на трубке 80 кВ и 160 мА соответственно, кернель конволюции FC01. Матрица 512×512 элементов, DFOV 40×40 см. Осуществлялась реконструкция срезов толщиной 2 мм, размер пиксела 0,4×0,4 мм. Визуальный анализ изображений проводился на профессиональном мониторе PA301W (Япония), диагональ экрана 29,8 дюймов, разрешение 2560×1600 точек.

Для визуализации медицинских изображений использовалась программа Merge eFilm Workstation©, с ее помощью врач-рентгенолог анализировал медицинское изображение: находил очаг патологии, оценивал его масштабы. Далее данные обрабатывались в программе „Рентгенолог+“ [10], которая конвертировала их из формата DICOM в текстовый файл, содержащий прямоугольную матрицу чисел Хаунсфилда (денситометрических плотностей в каждом вокселе изучаемого среза). Выделенная область (теперь это прямоугольная матрица чисел) рассматривалась специалистом для подбора оптимальных границ рабочей области программы, так как необходимо, чтобы контур попадал в выделяемую область. Область обычно выбиралась такой, чтобы на каждом срезе (т.е. в каждой прямоугольной матрице чисел) располагался один очаг заболевания.

Для каждого пациента был получен набор срезов томографического изображения, содержащих весь объем ШОЛ исследуемого пациента. Таким образом, база данных составила 982 среза для рака (49 пациентов) и 493 для туберкулеза (26 пациентов).

Прямоугольная матрица чисел Хаунсфилда для каждого среза использовалась при построении контура ШОЛ. На реконструированном изображении проводилась визуальная оценка контура, и выбиралось значение денситометрического показателя, по мнению врача, соответствующее вокселу исследуемого контура (Z_0). После чего всем вокселям, значения денситометрических показателей которых были больше Z_0 , присваивалось значение 1, а вокселям, значения которых меньше Z_0 , — 0. Выбранное значение Z_0 применялось ко всем срезам пациента. В результате из исходного изображения получалось бинарное, в котором граница контура уже явно представлена. На рис. 1 представлено бинарное изображение, на котором виден контур ШОЛ (i, j — координаты, наложенные на изображение).

Для количественного описания особенностей контура очага на медицинском изображении введен вектор в полярной системе координат, исходящий из центра масс фигуры (рис. 2). Центр масс фигуры определялся следующим образом:

$$x_c = \frac{\sum iZ(i, j)}{\sum Z(i, j)}, \quad y_c = \frac{\sum jZ(i, j)}{\sum Z(i, j)}, \quad (1)$$

где $Z(i, j)$ — это денситометрический показатель ткани в точке среза с координатами i, j , а суммирование происходит по всем i_n и j_n .

Для данного вектора вычислялись модуль радиуса-вектора $R(n)$ и полярный угол $\varphi(n)$:

$$R(n) = \sqrt{(j_n - x_c)^2 + (i_n - x_c)^2}, \quad n = 1, \dots, N; \quad (2)$$

$$\varphi(n) = \arccos\left(\frac{j_n}{R_n}\right), \quad n = 1, \dots, N. \quad (3)$$

Эта процедура выполнялась для каждого контура программой, написанной в среде математического пакета Maple©. Множество модулей радиуса-вектора $R(n)$ и полярных углов $\varphi(n)$ является сигнатурой выделенного контура [11]. Основываясь на полученных сигнатурах, можно было вводить количественные характеристики особенностей исследуемых контуров [12].

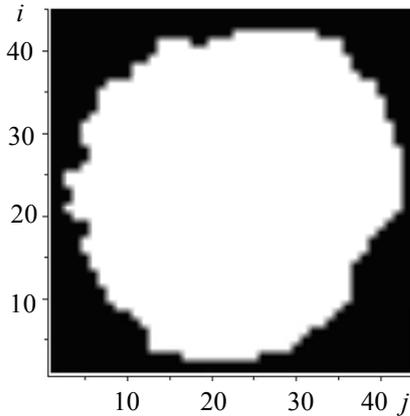


Рис. 1

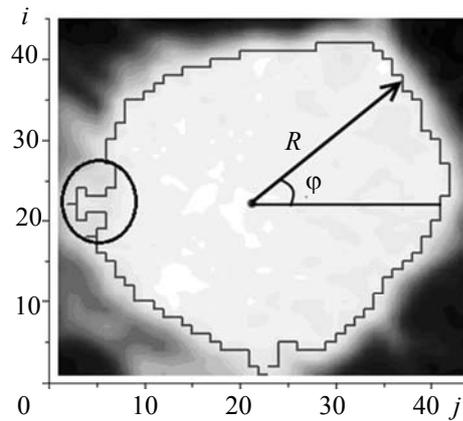


Рис. 2

Для получения количественной характеристики контура медицинского изображения, в частности, использован метод, основанный на вычислении спектральной плотности мощности центрированной сигнатуры радиуса. С помощью такого параметра вычисляется энтропия $H(S(k))$ для гармоник k сигнатуры радиуса:

$$H(S) = - \sum_{k=0}^{(N-1)/2} S(k) \ln S(k). \quad (4)$$

При использовании второй сигнатуры угла $\varphi(n)$ можно получить еще одну количественную характеристику контура — число локальных максимумов M , которые соответствуют изменению направления вращения радиуса-вектора $R(n)$. Локальные максимумы образуются в результате прохождения радиуса-вектора по контуру в областях, подобных изображенным на рис. 2 (область выделена кругом).

При такой траектории направление движения радиуса-вектора вдоль левой части выделенного участка контура изменяется, таким образом, получается „петля“. Очень часто петля свидетельствует о том, что в области патологии находится сосуд, и это может служить диагностическим признаком.

Число таких „петель“ обозначим L и получим характеристику, называемую мультипетленостью:

$$M = LH(S). \quad (5)$$

Энтропия сигнатуры радиуса-вектора контура, мультипетленость, значение максимума нормированной спектральной плотности мощности и число локальных максимумов вычислялись по значениям денситометрического показателя каждого вокселя, принадлежащего контуру.

Вычисления проводились с помощью программ, написанных на языках Maple© и LabVIEW©. Некоторые статистические моменты полученных выборок для диагностических характеристик представлены в таблице.

| Исследуемый параметр | Тип заболевания | Среднее значение | Стандартная ошибка среднего |
|--|-----------------|------------------|-----------------------------|
| Количество локальных максимумов | Рак | 5,789 | 0,174 |
| | Туберкулез | 5,012 | 0,098 |
| Энтропия сигнатуры радиуса-вектора контура | Рак | 1,337 | 0,014 |
| | Туберкулез | 1,117 | 0,011 |
| Мультиплетность | Рак | 7,797 | 0,259 |
| | Туберкулез | 5,758 | 0,140 |
| Значение максимума нормированной спектральной плотности мощности | Рак | 0,573 | 0,006 |
| | Туберкулез | 0,647 | 0,004 |

Результаты. Был проанализирован характер распределения показателей в программе STATISTICA© по критерию Шапиро—Уилка, оказалось, что выборки не подчиняются нормальному распределению, несмотря на графическое представление этого теста для энтропии гармоник сигнатур радиуса-вектора (рис. 3). Есть визуальное сходство с нормальным распределением, однако проверка по критерию хи-квадрат показала: маловероятно, что изучаемые характеристики принадлежат нормальному распределению. В связи с этим было предложено проверить возможность их использования для дифференциальной диагностики ШОЛ с применением параметрического (Стьюдента) и непараметрического (Манна—Уитни) метода.

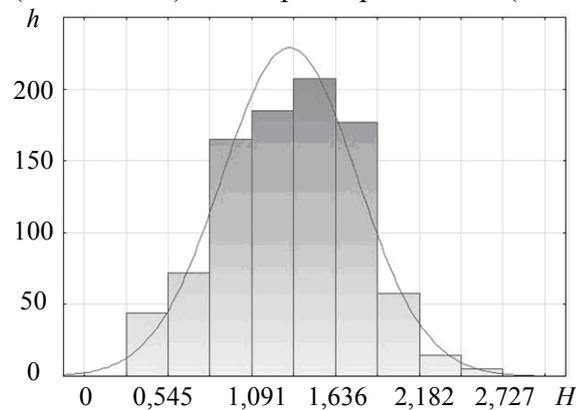


Рис. 3

Нулевая гипотеза заключалась в принадлежности исследуемых параметров для разных диагнозов к одной генеральной совокупности, т.е. указанные количественные характеристики контуров статистически неразличимы для разных видов заболеваний. Если принять эту гипотезу, то нельзя использовать предлагаемые характеристики в качестве диагностических параметров.

Согласно критерию Стьюдента, вероятность ошибки 1-го рода для $M = 4,9 \times 10^{-3}$, это позволяет отвергнуть нулевую гипотезу для всех характеристик, при условии, что их распределения подчиняются нормальному закону. В этом случае все рассмотренные характеристики контура могут быть диагностическими параметрами.

Согласно критерию Манна—Уитни, вероятность ошибки 1-го рода для $M = 0,14$. Однако такие показатели, как количество локальных максимумов, энтропия сигнатуры радиуса-вектора контура, значение максимума нормированной спектральной плотности мощности, для указанных заболеваний могут служить диагностическими параметрами.

Заключение. Характеристики контура изображения, описанные выше, можно применять в дифференциальной диагностике и других заболеваний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коновалов В. К., Лобанов М. Н., Леонов С. Л., Шайдук А. М., Колмогоров В. Г., Домбровский А. А. Способ количественной оценки структуры шаровидных образований легких при мультиспиральной компьютерной томографии // Вестн. Алтайской науки. 2013. № 2-1. С. 149—153.
2. Dobrescu R., Dobrescu M., Mocanu M., Popescu D. Medical images classification for skin cancer diagnosis based on combined texture and fractal analysis // WSEAS Transactions on Biology and Biomedicine. 2010. Vol. 7, N 3. P. 223—232.
3. Календер В. Компьютерная томография. М.: Техносфера, 2006.
4. Шайдук А. М., Молодкин И. В. Оценка количества диагностических параметров для дифференциации заболеваний легких // Мед. физика. 2015. № 2 (66). С. 66—73.
5. Власов П. В. Лучевая диагностика заболеваний органов грудной. М.: Видар-М, 2008.
6. Хофер М. Компьютерная томография. Базовое руководство. М.: Мед. лит., 2008.
7. Al-Kadi O. S., Watson D. Texture analysis of aggressive and nonaggressive lung tumor CE CT images // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2008. Vol. 55, N 7. P. 1822—1830.
8. Кириллова О. А., Кошечкина Н. А., Волкова Л. Д., Захарова Е. В. Дифференциально-диагностические критерии лучевой диагностики интрапаравертебральных опухолей различного гистогенеза у детей // Матер. Всерос. конгр. лучевых диагностов. М., 6—8.06.2007. С. 165—166.
9. Линденбратен Л. Д., Королюк И. П. Медицинская радиология и рентгенология (основы лучевой диагностики и лучевой терапии). М.: Медицина, 2003.
10. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ №2013613849. Получение параметров компьютерных изображений / О. И. Ворона, С. Л. Леонов, В. К. Коновалов, А. М. Шайдук. 17.04.2013.
11. Klonowski W., Stepien R., Stepien P. Simple fractal method of assessment of histological images for application in medical diagnostics // Nonlinear biomedical physics. 2010. Vol. 4, N 7. DOI:10.1186/1753-4631-4-7
12. Останин С. А., Шайдук А. М. Количественная оценка сложности контура медицинских изображений // Журнал радиоэлектроники. 2013. № 2.

Сведения об авторах

- Иван Васильевич Молодкин** — аспирант; АлтГУ, кафедра общей и экспериментальной физики; Алтайский краевой онкологический диспансер; медицинский физик КГБУЗ; E-mail: tian.08@mail.ru
- Александр Михайлович Шайдук** — д-р физ.-мат. наук, профессор; АлтГУ, кафедра общей и экспериментальной физики; Алтайский государственный медицинский университет, кафедра физики и информатики; заведующий кафедрой; E-mail: shamdom@gmail.com
- Сергей Александрович Останин** — канд. физ.-мат. наук, доцент; АлтГУ, кафедра прикладной информатики в экономике, государственном и муниципальном управлении; ООО „Алтайский геофизический завод“; главный инженер; E-mail: ostanin1963@mail.ru
- Владимир Константинович Коновалов** — д-р мед. наук, профессор; Алтайский государственный медицинский университет, кафедра лучевой диагностики; E-mail: kon4867@gmail.com
- Сергей Леонидович Леонов** — д-р техн. наук, профессор; АлтГТУ, кафедра технологии автоматизированных производств; E-mail: sergey_and_nady@mail.ru
- Ольга Васильевна Борисенко** — аспирант; Алтайский государственный медицинский университет; E-mail: Dr_Borisenko.Olga@mail.ru

Поступила в редакцию
17.04.18 г.

Ссылка для цитирования: Молодкин И. В., Шайдук А. М., Останин С. А., Коновалов В. К., Леонов С. Л., Борисенко О. В. Спектральные характеристики контуров шаровидных образований легких // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 10. С. 908—914.

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF CONTOURS OF LUNG SPHERICAL FORMATIONS

I. V. Molodkin^{1,2}, A. M. Shayduk^{1,3}, S. A. Ostanin^{1,4}, V. K. Konovalov³, S. L. Leonov⁵, O. V. Borisenko³

¹ Altai State University, 656049, Barnaul, Russia
E-mail: tian.08@mail.ru

² Altai Regional Oncological Dispensary, 656049, Barnaul, Russia

³ Altai State Medical University, 656038, Barnaul, Russia

⁴ LLC "Altai Geophysical Plant", 656011, Barnaul, Russia

⁵ Polzunov Altai State Technical University, 656038, Barnaul, Russia

A two-dimensional array of densitometric parameters obtained by processing tomographic medical images of patients with verified diagnoses of lung diseases (cancer and tuberculosis) is analyzed. The possibility of using information about the properties of contours of lung spherical formations is investigated. A technique for constructing contours of such formations based on the analysis of digitized medical images is applied. A mathematical method introduced for describing the contour is based on calculating the conditional center of mass of the image of the pathology and obtaining two one-dimensional signature functions, a module of the radius vector drawn from the center of mass and its polar angle, as functions of the conditional number of the pixel belonging to the contour. Using the spectral analysis of digitized medical images, such characteristics of the contours of the formations under investigation as the spectral entropy of the contour, multiplicity, and the number of local maxima, are calculated. Analysis of statistical difference of these characteristics for different types of diseases (cancer and tuberculosis) was carried out. It is shown that several studied characteristics of the contours are statistically different and therefore enable differential diagnosis of lung disease.

Keywords: computer tomography, medical images, contour of lung spherical formation, differential diagnostics, spectral analysis, cancer, tuberculosis

REFERENCES

1. Konovalov V.K., Lobanov M.N., Leonov S.L., Shayduk A.M., Kolmogorov V.G., Dombrovskiy A.A. *Vestnik altaiskoy nauki*, 2013, no. 2-1, pp. 149–153 (in Russ.)
2. Dobrescu R., Dobrescu M., Mocanu M., Popescu D. *WSEAS Transactions on Biology and Biomedicine*, 2010, no. 3(7), pp. 223–232.
3. Kalender W.A. *Computer Tomography: Fundamentals, System Technology, Image Quality, Applications*, 2005.
4. Shayduk A.M., Molodkin I.V. *Meditinskaya Fizika* (Medical Physics), 2015, no. 2(66), pp. 66–73 (in Russ.)
5. Vlasov P.V. *Lučevaya diagnostika zabolevaniy organov grudnoy kletki* (Radiodiagnosis of Diseases of Bodies of a Thorax), Moscow, 2008. (in Russ.)
6. Hofer M. *CT Teaching Manual*, Georg Thieme Verlag, 2000, 176 p.
7. Al-Kadi O.S., Watson D. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2008, no. 7(55), pp. 1822–1830.
8. Kirillova O.A., Koshechkina N.A., Volkova L.D., Zakharova E.V. *Materialy Vserossiyskogo kongressa lučevykh diagnostov* (Materials of the All-Russian Congress of Beam Diagnosticians), Moscow, 6–8 June 2007, pp. 165–166. (in Russ.)
9. Lindenbraten L.D., Korolyuk I.P. *Meditinskaya radiologiya i rentgenologiya (osnovy lučevoy diagnostiki i lučevoy terapii)* (Medical Radiology and Roentgenology (Basis of Radiodiagnosis and Radiation Therapy)), Moscow, 2003. (in Russ.)
10. Certificate on the state registration of the computer programs 2013613849 RU, *Polucheniye parametrov komp'yuternykh izobrazheniy* (Obtaining Parameters of Computer Images), O.I. Vorona, S.L. Leonov, V.K. Konovalov, A.M. Shayduk, 17.04.2013. (in Russ.)
11. Klonowski W., Stepien R., Stepien P. *Nonlinear biomedical physics*, 2010, no. 7(4). DOI:10.1186/1753-4631-4-7 (in Russ.)
12. Ostanin S.A. Shayduk A.M. *Zhurnal radioelektroniki*, 2013, no. 2. (in Russ.)

Data on authors

Ivan V. Molodkin

— Post-Graduate Student; Altai State University, Department of General and Experimental Physics; Altai Regional Oncological Dispensary; Medical Physicist; E-mail: tian.08@mail.ru

- Alexander M. Shayduk** — Dr. Sci., Professor; Altai State University, Department of General and Experimental Physics; Altai State Medical University, Department of Physics and Informatics; Head of the Department; E-mail: shamdom@gmail.com
- Sergey A. Ostanin** — PhD, Associate Professor; Altai State University, Department of Applied Informatics in Economics; LLC "Altai Geophysical Plant"; Chief Engineer; E-mail: ostanin1963@mail.ru
- Vladimir K. Konovalov** — Dr. Sci., Professor; Altai State Medical University, Department of Radiology; E-mail: kon4867@gmail.com
- Sergey L. Leonov** — Dr. Sci., Professor; Polzunov Altai State Technical University, Department of Automated Production Technology; E-mail: sergey_and_nady@mail.ru
- Olga V. Borisenko** — Post-Graduate Student; Altai State Medical University; E-mail: Dr_Borisenko.Olga@mail.ru

For citation: Molodkin I. V., Shayduk A. M., Ostanin S. A., Konovalov V. K., Leonov S. L., Borisenko O. V. Spectral characteristics of contours of lung spherical formations. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 10. P. 908—914 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-10-908-914