УДК 519.876.5
DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-11-959-963

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ИДЕНТИФИКАЦИИ ХАОТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОЗГОВОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ

А. А. Мусаев[1,2], А. И. Загайнов[3]

[1]*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), 190013, Санкт-Петербург, Россия*
E-mail: amusaev@technolog.edu.ru
[2]*Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, 199178, Санкт-Петербург, Россия*
[3] *Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия*

Рассматриваются возможности разработанной автоматизированной системы, предназначенной для анализа параметров мозгового кровообращения. Изложены методы численной реализации фрактальной размерности и намечены пути ее вычисления в режиме реального времени. Показан интерфейс реализованного в среде Qt Creator программного обеспечения. Приведен пример построения фрактальных размерностей мозгового кровообращения пациента, рассчитанный в реальном времени с помощью доплерографа Multi-DopX.

Ключевые слова: *восстановленный аттрактор, фазовое пространство, корреляционная размерность, линейная скорость кровотока, системное артериальное давление*

Введение. В настоящее время развитие методов анализа биомедицинских сигналов имеет явную тенденцию, направленную на исследование возможностей нелинейных подходов к изучению их закономерностей. Особенно отчетливо эта тенденция наблюдается при построении нелинейных базисов для разложения исходного сигнала, учете нелинейных особенностей при разработке методов нелинейного регрессионного анализа и RS-статистики, а также при исследовании сигнала в конечномерных фазовых пространствах. Все чаще встречаются прикладные задачи, связанные с использованием таких категорий, как фрактал, хаос и, особенно, детерминированный хаос. Интерес к анализу фракталов основан на постулате о существовании конечномерной системы нелинейных уравнений для исходного отображения, что расширяет границы конструктивных исследований, в частности, для прогнозирования состояния нелинейных систем.

Методология фрактального анализа. Построение фрактала из исходного одномерного конечного сигнала связано с восстановлением его аттрактора. Данное положение вытекает из теории динамических систем и теории детерминированного хаоса. Этот факт отчетливо прослеживается в известной теореме Такенса, в которой предложен способ построения восстановленного аттрактора, принадлежащего гладкому многообразию. Положив в качестве координат вектора состояния ряд наблюдений, смещенный относительно себя на некоторое постоянное значение, получим

$$\mathbf{x}(i) = \Big(a(i), a(i+\tau), \ldots, a\big(i+\tau(n-1)\big)\Big) = (x_1, x_2, \ldots, x_n),$$

где $a(i)$ — исходный временной ряд, τ — временная задержка, вектор $\mathbf{x}_i = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ — координаты одной точки на восстановленном аттракторе, n — размерность пространства вложения, удовлетворяющая условиям теоремы Такенса: $n \geq 2[d_A]+1,$ де d_A — размерность восстановленного аттрактора.

Свойства построенного таким образом аттрактора метрически (и вероятностно) эквиваленты исходному аттрактору динамической системы. Однако для реальных временных рядов эта теорема неприменима в силу их конечности. К сожалению, к настоящему моменту для конечных временных рядов подобные теоретические результаты не получены. Существуют лишь оценки длины временного ряда, необходимые для характеристики степени подобия аттрактора с конечным числом значений.

Другой параметр, требующий уточнения при численной реализации, — это параметр τ. Самый приемлемый способ, рекомендуемый в литературе [1, 2], заключается в нахождении первого нуля автокорреляционной функции: $B(\tau)=\frac{1}{N-\tau}\sum_{k=1}^{N-\tau}(a_k-\overline{a})(a_{k+\tau}-\overline{a})$, где $a_k=a(k\Delta t)$ — исходный временной ряд.

Применение этого метода связано с гипотезой некоррелированности координат точек аттрактора в силу ортогональности векторов базиса. Однако выбор параметра задержки таким способом не всегда является оптимальным. Альтернатива ему — построение функции средней взаимной информации по методу, предложенному в работах [2—4]. Интервал $[\min_k a_k, \max_k a_k]$ делится на L равных частей. Как правило [2], значение L выбирается по формуле Старка: $L=\left[\log_2 N\right]+1$. Событие „$a(t)$ принадлежит i-му интервалу“ обозначается как A_i, а событие „$a(t+\tau)$ принадлежит j-му интервалу“ — как B_j; P — вероятность соответствующего события. Функция средней взаимной информации определяется как

$$I(\tau)=-\sum_{i=1}^{L}\sum_{j=1}^{L}P(A_iB_j)\log_2\left[\frac{P(A_iB_j)}{P(A_i)P(B_j)}\right]$$

и в качестве оптимального параметра задержки выбирается первый локальный минимум построенной функции:

$$\tau_{\text{opt}}=\min_{\tau_i}\{I'(\tau_i)=0,\quad I'(\tau_i^-)<0,\quad I'(\tau_i^+)>0\}.$$

Функция средней взаимной информации является более точной мерой независимости точек аттрактора [2]; для некоторых тестовых данных (аттрактор системы уравнений Лоренца) получение значения оптимальной задержки этим способом более предпочтительно.

Фрактальные размерности и их численная реализация. Наиболее известными характеристиками аттрактора динамической системы являются вероятностные (фрактальные) размерности. Под вероятностью здесь понимается вероятность нахождения точки в определенной области самого аттрактора в фазовом пространстве. Вариант фрактальной размерности — размерность Реньи [5]:

$$D_q=\frac{1}{1-q}\lim_{\varepsilon\to 0}\frac{\ln\left(\sum_{i=1}^{M(\varepsilon)}p_i^q\right)}{\ln(1/\varepsilon)}, \tag{1}$$

где $M(\varepsilon)$ — минимальное количество разбиений на кубические фрагменты со стороной ε, образующие область, полностью покрывающую аттрактор; p_i — вероятность пересечения i-м кубическим фрагментом фазовой траектории динамической системы; $q=1-p_i$.

Частными случаями размерности Реньи являются размерность Колмогорова, информационная размерность и корреляционная размерность, получаемые при q, равном 0, 1, 2 соответственно. Для пространственно однородных аттракторов все эти размерности одинаковы. В общем случае, исходя из определения, размерность Реньи является монотонно убывающей функцией q: $q_1<q_2 \Rightarrow D_{q_1}\ge D_{q_2}$.

Следовательно, для рассматриваемых аттракторов параметр q должен быть положительным. В настоящее время этот параметр принят равным двум (корреляционная размерность является оценкой информационной размерности, для ее вычисления разработан универсальный алгоритм, из которого автоматически следует оценка соответствующей корреляционной или аппроксимированной энтропии). Согласно выражению (1) корреляционная размерность определяется как

$$D_c = \frac{1}{1-2}\lim_{\varepsilon\to 0}\frac{\ln\left(\sum_{i=1}^{M(\varepsilon)} p_i^2\right)}{\ln(1/\varepsilon)} = \lim_{\varepsilon\to 0}\frac{\ln\left(\sum_{i=1}^{M(\varepsilon)} p_i^2\right)}{\ln\varepsilon}. \quad (2)$$

Выражение (2) удобно представить в асимптотической форме: $\lim_{r\to 0}\frac{\ln(C(r))}{\ln r}$, где $C(r) = \lim_{m\to\infty}\frac{1}{m^2}\sum_{i,j=1}^{m}\theta(r-\rho(x_i,x_j))$ — корреляционный интеграл; $\theta(\alpha) = \begin{cases}1, \alpha \ge 0,\\ 0, \alpha < 0\end{cases}$ — функция Хевисайда; $\rho(x_i,x_j)$ — функция расстояния в n-мерном пространстве.

Вследствие фрактальности исследуемого объекта можно предположить, что $C(r) \sim r^{D_c}$, откуда следует $\ln(C(r)) \sim D_c \ln r$, и корреляционную размерность можно оценить по наклону прямой, полученной при логарифмировании корреляционного интеграла.

Программный комплекс фрактального анализа. Вычисление корреляционной размерности в режиме реального времени осложняется, прежде всего, ограниченными возможностями автоматизированного вычисления необходимых параметров (размерности пространства вложения, параметра задержки, скейлингового диапазона и пр.). Поэтому в предлагаемом комплексе фрактального анализа предусмотрена возможность изменения и автоматизированного вычисления этих параметров с помощью оригинальных алгоритмов, использующих функции вероятности нахождения точек на аттракторе. Скользящее окно (т.е. текущий рассматриваемый массив) перемещается по временному ряду (сигналу), тем самым изменяя вычисляемую характеристику во времени. При этом изменяется аттрактор системы, его размерность и параметры. Здесь необходимо подчеркнуть, что указанные параметры могут изменяться уже при незначительном перемещении скользящего окна, что при большом количестве значений временного ряда представляет определенную трудность, так как на каждом шаге необходимо выполнять пересчет всех точек аттрактора.

Программный комплекс был реализован в среде программирования Qt Creator. Основные возможности комплекса состоят в следующем:

— представлении исходных временных рядов;

— автоматическом изменении аттрактора сигнала в режиме реального времени и его перестроении при изменении параметра задержки, а также в визуализации соответствующего двухмерного аттрактора системы;

— расчете параметров (левого и правого) скейлингового диапазона;

— вычислении корреляционной размерности на скользящем окне;

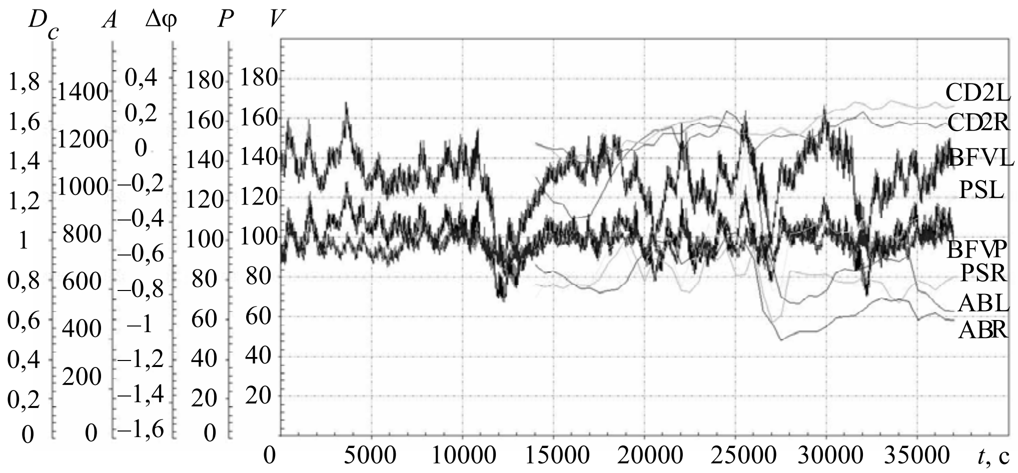
— аппроксимации динамики изменения корреляционной размерности;

— вычислении и визуализации специальных параметров, служащих, в частности для характеристики деятельности системы мозгового кровотока (спектральная плотность в диапазоне М- и В-волн, фазовый сдвиг, кросс-амплитуда и др.).

В комплексе предусмотрены возможности изменения длины скользящего окна и его перемещения, изменения скорости воспроизведения наблюдаемого процесса (при считывании из файла), принудительного изменения указанных выше параметров аттрактора.

На рисунке приведен пример мультиграфической визуализации полученных результатов. Доплерограф Multi-DopX позволяет построить временные ряды линейной скорости кровотока и системного артериального давления. С помощью программного комплекса на одном графике могут быть построены сами временные ряды, сдвиг фаз между М-волнами, амплитуда

В-волн, корреляционные размерности сигналов. Для количественного анализа сигнала могут быть установлены пять возможных шкал — скорость V, давление P, фазовый сдвиг $\Delta\varphi$, амплитуда A и корреляционная размерность D_c. Так, для исследуемого сигнала линейная скорость кровотока слева изменялась от 1,38 до 1,64, справа — от 1,38 до 1,68; как видно из построенных графиков (CD2L и CD2R) эти показатели подобны. При этом фазовые сдвиги М-волн между линейными скоростями и давлением (PSR и PSL) изменялись (в соответствующем масштабе шкал) от –0,8 до 0 и от –0,95 до –0,65 рад, а амплитуды в диапазоне В-волн (ABL и ABR) изменялись от 520 до 1320 мс и от 390 до 830 мс. Как следует из полученных результатов, построенная аппроксимация корреляционной размерности точнее отображает внутренний характер структуры обрабатываемого временного ряда, нежели рассмотренные спектральные показатели.



Заключение. Предложен программный комплекс вычисления фрактальных размерностей линейной скорости кровотока и системного артериального давления системы мозгового кровотока в режиме реального времени. При программной реализации комплекса необходимые характеристики (размерность пространства вложения, параметр задержки, скейлинговый диапазон и пр.) могут быть изменены уже в процессе вычислений. На примере средней скорости мозгового кровотока и системного артериального давления пациента с помощью допплерографа Multi-DopX получены временные ряды указанных показателей, вычислены их фрактальные размерности и спектральные компоненты, выявлены их диапазоны и особенности изменения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Махортых С. А., Сычев В. В.* Алгоритмы вычисления характеристик стохастических сигналов и их применение к анализу электрофизиологических данных // Сб. тез.: Математическая и вычислительная биология, 4-я Пущинская конф. молодых ученых. 1999.

2. *Головко В. А.* Нейросетевые методы обработки хаотических процессов // Науч. сессия МИФИ-2005: VII Всерос. науч.-техн. конф. „Нейроинформатика-2005“. М.: МИФИ, 2005. С. 43—91.

3. *Меклер А. А.* Применение аппарата нелинейного анализа динамических систем для обработки сигналов ЭЭГ // Актуальные проблемы современной математики: Ученые записки. 2004. Т. 13(2). С. 112—140.

4. *Янсон Н. Б., Анищенко В. С.* Моделирование динамических систем по экспериментальным данным // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1995. Т. 3, № 3. С. 112—121.

5. *Перерва Л. М., Юдин В. В.* Фрактальное моделирование: Учеб. пособие / Под общ. ред. *В. Н. Гряника*. Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2007.

Сведения об авторах

Александр Азерович Мусаев — д-р техн. наук, профессор; СПбГТИ(ТУ), кафедра системного анализа и информационных технологий, зав. кафедрой; СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: amusaev@technolog.edu.ru

Артем Игоревич Загайнов — ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра математического и программного обеспечения; ст. преподаватель; E-mail: zagainov239@gmail.com

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию 01.06.16 г.

Ссылка для цитирования: *Мусаев А. А., Загайнов А. И.* Программный комплекс идентификации хаотических параметров мозгового кровообращения // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 11. С. 959—963.

SOFTWARE COMPLEX FOR IDENTIFICATION OF CHAOTIC PARAMETERS OF CEREBRAL CIRCULATION

A. A. Musaev [1,2], A. I. Zagaynov [3]

[1]*St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), 190013, St. Petersburg, Russia*

[2]*St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, 199178, St. Petersburg, Russia*
E-mail: amusaev@technolog.edu.ru

[3] *A. F. Mozhaysky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia*

Features of developed automated system for identification of chaotic parameters of cerebral circulation are considered. Methods for numerical implementation of the fractal dimension and implementation of the calculations in real time are described. The software interface developed in Qt Creator environment is demonstrated. An example of construction of fractal dimensions of cerebral circulation of a patient calculated in real time using Dopplerograph Multi-DopX is presented.

Keywords: reconstructed attractor, phase space, correlation dimension, linear velocity of blood flow, systemic arterial pressure

Data on authors

Alexander A. Musaev — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), Department of System Analysis and Information Technologies; Head of the Department; SPIIRAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; E-mail: amusaev@technolog.edu.ru

Artem I. Zagaynov — A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Mathematics and Software; Senior Lecturer; E-mail: zagainov239@gmail.com

For citation: *Musaev A. A., Zagaynov A. I.* Software complex for identification of chaotic parameters of cerebral circulation // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 11. P. 959—963 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-11-959-963