

Н. Т. Абдуллаев¹, канд. техн. наук, доц., e-mail: a.namik46@mail.ru,
Азербайджанский технический университет, г. Баку,
М. М. Гасанкулиева², диссертант, e-mail: metahasanquliyeva@rambler.ru,
А. Д. Джабиева², канд. техн. наук, доц., e-mail: aynur.jabiyeva@outlook.com,
Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку

Применение нейросетевой технологии при фликкер-шумовой спектроскопии электрокардиограммы

В качестве метода нелинейной динамики, позволяющего извлекать заключенную в сигналах, продуцируемых организмом человека, информацию, рассматривается метод фликкер-шумовой спектроскопии. Новые возможности фликкер-шумовой спектроскопии в распознавании специфических особенностей биомедицинских сигналов обусловлены введением информационных параметров. Эти параметры, характеризующие составляющие исследуемых сигналов на разных частотных диапазонах, необходимы для расчета диагностических показателей. Автоматизацию процесса диагностирования функционального состояния сердечно-сосудистой системы предлагается реализовать с помощью искусственных нейронных сетей.

Ключевые слова: фликкер-шум, спектроскопия, параметризация, диагностические показатели, хаотический сигнал, автокорреляционная функция, спектр мощности, нейронная сеть

Введение

Динамика многих физиологических процессов, протекающих в организме человека, является хаотической и может быть описана с позиций теории нелинейных детерминированных систем. Хаотичность поведения сердечного ритма, как правило, связывается с деятельностью параметрической нервной системы [1—3]. В области исследования сердечно-сосудистой системы выделяют, в основном, методы анализа, математически применяемые к нестационарным сигналам, статистические свойства которых изменяются со временем. Часто они состоят из кратковременных высокочастотных компонентов, сопровождаемых длительными низкочастотными составляющими.

С учетом такого характера биоэлектрических потенциалов и, в частности, электрокардиографических сигналов наиболее приемлемым для их анализа может быть метод нелинейной динамики с вычислением количественных характеристик хаоса [4—6]. Анализ сигналов, имеющих такой динамический характер, осно-

вывается, как правило, на применении метода фликкер-шумовой спектроскопии, учитывающего в сложной динамической системе эффект перемежаемости (intermittency), который представляет собой смену относительно длительных участков ламинарного или регулярного во времени поведения характеристик неравновесной динамической системы, сингулярными участками хаотических всплесков и скачков [7—10].

Такая динамика характерна и для электрокардиограмм, имеющих ламинарную фазу, представленную слабыми изменениями (зубцы Р, Т, изолиния) переменной на относительно протяженных временных интервалах (T), и резкие скачкообразные изменения (QRS -комплекс) на коротких временных интервалах (τ). Для извлечения информации из сложных сигналов в методе фликкер-шумовой спектроскопии используется автокорреляционная функция $\psi(\tau)$. Для классификации информации, заключенной в функции $\psi(\tau)$, как правило, используется не сама эта функция, а некоторые ее преобразования — спектр мощности $s(f)$ и разностный момент $\varphi^{(2)}(\tau)$ второго порядка. Информация,

извлекаемая из анализа зависимостей $s(f)$ и $\varphi^{(2)}(\tau)$, построенных на основе временных рядов сигнала $V(t_i)$, позволяет получить ряд информативных параметров, которые имеют диагностическую ценность.

На основе вычислительного эксперимента были получены зависимости для нормального состояния сердечно-сосудистой системы и ряда "катастрофических" аритмий (желудочковая тахикардия, предсердная фибрилляция, предсердная аритмия). При этом использовались экспериментальные данные с общедоступного сайта www.PhysioNet.org.

Определение информативных диагностических параметров

В результате анализа спектра мощности $s(f)$ для сингулярной составляющей ЭКГ-сигнала получены информативные параметры: T_0 — определяющее некоторое характерное время, в пределах которого реализуется взаимосвязь измеряемой динамической переменной $V(t_i)$; n_0 — безразмерный параметр, эффективно определяющий, каким образом эта взаимосвязь теряется по мере уменьшения частот до значений $1/2\pi T_0$; $s(0)$ — вклад в спектр мощности $s(f)$, определяемой наиболее высокочастотной сингулярной составляющей [11].

Параметризация регулярной составляющей ЭКГ-сигнала осуществляется с помощью выражения $\varphi^{(2)}(\tau)$ с параметрами T_1 , τ_1 и H_1 [12]. При этом параметр T_1 определяет характерное время, на котором значения динамических переменных $V(t_i)$ не коррелируют. Для получения достоверных значений дисперсии σ_1^2 необходимо ее рассчитывать на временных интервалах, превышающих T_1 . При этом параметр H_1 (показатель Херста) показывает, по какому закону теряется взаимосвязь измеряемых в разные моменты времени значений $V(t_i)$.

Таким образом, при анализе сложного хаотического сигнала, каковым является ЭКГ-сигнал, рассматривается совокупность шести параметров, характеризующая корреляционные взаимосвязи в последовательностях нерегулярностей-"скачков" и нерегулярностей-"всплесков", свойственных данному сигналу.

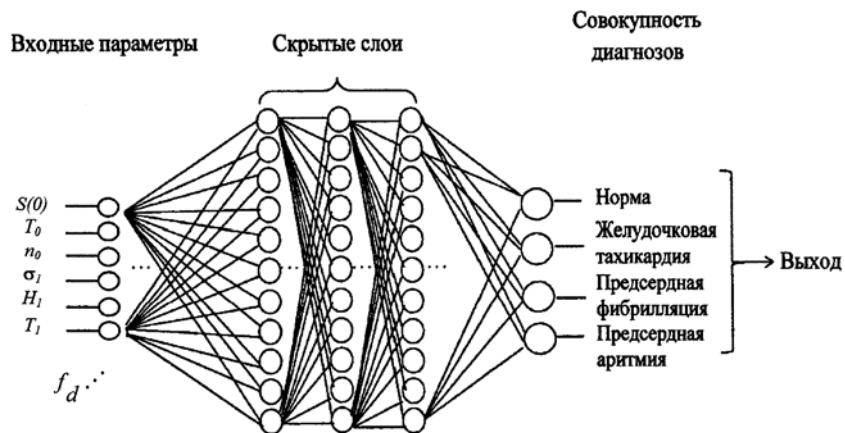


Рис. 1. Структурная схема предлагаемой искусственной нейронной сети

Выбор искусственной нейронной сети и ее характеристики

Полученные значения совокупности параметров сингулярной и регулярной составляющих ЭКГ-сигналов могут быть использованы для дифференциальной диагностики функционального состояния сердечно-сосудистой системы с помощью искусственных нейронных сетей, где указанные параметры рассматриваются в качестве входных данных.

Для вычислительного эксперимента была выбрана персептронная трехслойная сеть с прямыми связями [13, 14] (рис. 1).

Для обучения нейронной сети был применен алгоритм обратного распространения ошибки (Back Propagation). Время обучения составило порядка 240 с, максимальная ошибка сети была порядка 0,05, степень обучения — порядка 0,01.

Для распознавания патологий сердечно-сосудистой системы может быть использован модульный вариант структуры построения нейросетевых блоков [15] (рис. 2).

Структура включает в себя несколько параллельно расположенных нейросетевых модулей, построенных на основе структуры многослойного персептрона. Преимуществом данной структуры является концентрация ресурсов каждого модуля на распознавании только одной патологии, что способствует уменьшению вероятности ошибки неверного заключения для всей системы в целом. Кроме того, расширяются функциональные возможности искусственной нейронной сети путем увеличения числа нейросетевых модулей для распознавания новых патологий без переобучения всей системы.

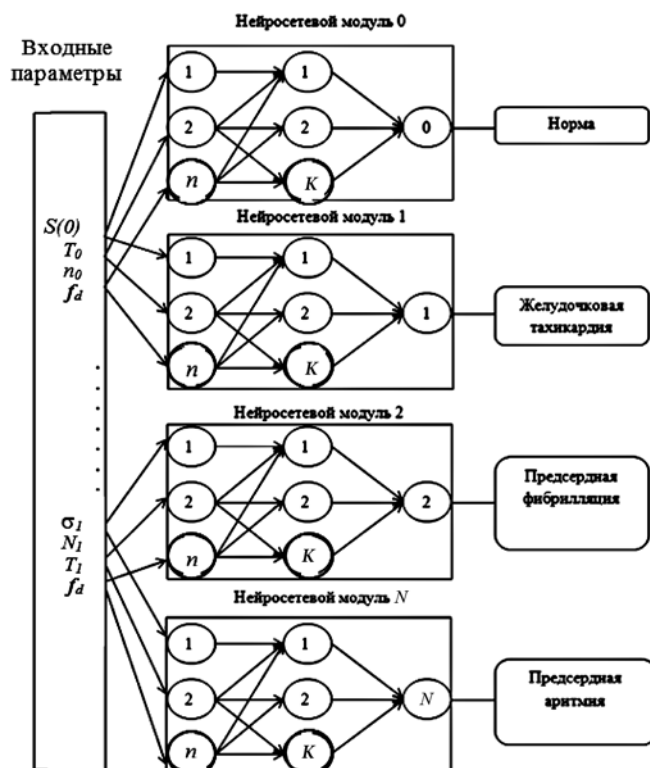


Рис. 2. Модульный вариант построения нейронной сети для распознавания патологий (n — число входных параметров; K — число нейронов промежуточного слоя; N — число анализируемых патологий)

Основным фактором, позволяющим реализовать выделение вклада нерегулярностей в анализируемые электрокардиографические сигналы, является вариация используемых частот дискретизации f_d реального сигнала [16]. Анализ зависимостей спектра мощности и разностного момента второго порядка, рассчитываемых на основе временных рядов с изменяющейся частотой дискретизации, позволяет для регулярной составляющей оценить меру "устойчивости", а для сингулярной составляющей — меру "вариативности" ее информативных параметров. При этом параметр f_d может быть использован в качестве дополнительного входного параметра искусственной нейронной сети для распознавания состояний сердечно-сосудистой системы.

Заключение

Представление электрокардиографических сигналов в виде последовательных нерегулярностей позволяет при анализе таких сигналов применять метод фликкер-шумовой спектроскопии. Хаотический сигнал, представленный временным рядом при фликкер-шумовой

спектроскопии, позволяет провести параметризацию этих сигналов и определить информативные диагностические показатели, характеризующие функциональное состояние сердечно-сосудистой системы. Совокупность информативных параметров, а также частота дискретизации сигнала, определяющая динамику изменения этих параметров, позволяет осуществлять классификацию сердечных заболеваний с помощью нейронной сети.

Список литературы

1. Luther S., Eneart M., Luther G. et al. Nonlinear Dynamics and arrhythmia of the Heart. Max Plank Institute for Dynamics and self-Organization // Research Report. 2006. P. 84–86.
2. Баевский Р. М., Иванов Г. Г., Чирейкин Л. В. и др. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем // Вестник аритмологии. 2001. № 24. С. 65–86.
3. Рангайян Р. М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход. М.: Физматлит, 2007. 440 с.
4. Баевский Р. М., Кириллов О. И., Клецкин С. З. Математический анализ измерений сердечного ритма при стрессе. М.: Наука, 1984. 219 с.
5. Истомина Т. В., Ломтев Е. А., Сотникова О. А. Хаотическая динамика в нарушениях сердечного ритма // Медицинская техника. 1999. № 1. С. 34–35.
6. Coldberger A. L., Rigney D. R., West B. J. Chaos and fractals in human physiology // Scientific American. 1990. N. 2. P. 35–41.
7. Горбань И. И. Статистически неустойчивые процессы: связь с фликкер, неравновесными, фрактальными и цветными шумами // Изв. вузов "Радиоэлектроника". 2012. Т. 55, № 3. С. 3–16.
8. Parkhutik V., Rayon E., Ferrer C., Timashev S., Vstovsky G. Forecasting of electrical breakdown in porous silicon using flicker-noise spectroscopy // Physica Status Solidi (a). 2003. Vol. 197. P. 471–475.
9. Тимашев С. Ф. Фликкер-шумовая спектроскопия: информация в хаотических сигналах. М.: Физматлит, 2007. 248 с.
10. Тимашев С. Ф., Демин С. А., Панишев О. Ю., Поляков Ю. С., Каплан А. Я., Нефедьев Ю. А. Фликкер-шумовая спектроскопия как "прибор" для индивидуальной медицины будущего // "Ученые записки" Казанского Государственного Университета. Сер. "Физико-математические науки", 2012. Т. 154, № 4. С. 161–177.
11. Абдуллаев Н. Т., Дышин О. А., Гасанкулиева М. М. Фликкер-шумовая спектроскопия электрокардиографических сигналов // Медицинская техника. 2015. № 5. С. 12–15.
12. Абдуллаев Н. Т., Дышин О. А., Гасанкулиева М. М. Параметризация регулярной составляющей ЭКГ-сигнала для выявления критических состояний сердечно-сосудистой системы // Медицинская техника. 2016. № 3. С. 15–18.
13. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. 1104 с.
14. Ежов А. И., Четчин В. В. Нейронные сети в медицине // Открытые системы. 1997. № 4. С. 34–37.
15. Сушкова Л. Т., Исаков Р. В., Альмабрук М., Лукьянова Ю. А. Результаты исследования нейронных сетей в задачах распознавания патологических изменений электрической активности сердца // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. № 9. С. 9–13.
16. Абдуллаев Н. Т., Дышин О. А., Гасанкулиева М. М. Информационные параметры и флуктуационная динамика электрокардиограмм при фликкер-шумовой спектроскопии // Информационные технологии. 2016. № 1. С. 72–75.

Application of Neuroet Network Technology for Flicker-Noise Spectroscopy of Electrocardiogram

The dynamics of many physiological processes occurring in the human body is chaotic and can be described from the positions of the theory of nonlinear deterministic systems. The randomness of the behavior of the heart rhythm, as a rule, is associated with the activity of the parametric nervous system. In the field of cardiovascular research, the analysis methods, mathematically applied to non-stationary signals, whose statistical properties change with time, are mainly isolated. Often they consist of short-time high-frequency components, accompanied by long low-frequency components. As a method of nonlinear dynamics, which makes it possible to extract the information contained in the signals produced by the human body, the method of flicker-noise spectroscopy is considered. New features of flicker-noise spectroscopy in the recognition specific features of biomedical signals are due to the introduction of information parameters. These parameters, which characterize the components of the signals under study at different frequency ranges, are necessary for the calculation of diagnostic indices. Automation of the process of diagnosing the functional state of the cardiovascular system is proposed to be realized with the help of artificial neural networks. Based on the computational experiment, dependencies were obtained for the normal state of the cardiovascular system and a number of "catastrophic" arrhythmias (ventricular tachycardia, atrial fibrillation, atrial arrhythmia). At the same time, experimental data were used from the public website www.PhysioNet.org/ For the computational experiment, a perceptron three-layer network with direct links. To learn the neural network, the Back Propagation algorithm was applied. The training time was about 240 s, the maximum network error was of the order of 0.05, the degree of training was about 0.01. To recognize the pathologies of the cardiovascular system, a modular version of the neural network building structure can be used.

Keywords: flicker noise, spectroscopy, parametrization, diagnostic indices, chaotic signal, autocorrelation function, power spectrum, neural network

References

1. Luther S., Enyeart M., Luther G. et al. Nonlinear Dynamics and arrhythmia of the Heart. Max Plank Institute for Dynamics and self-Organization, *Research Report*, 2006, p. 84–86.
2. Baevskiy R. M., Ivanov G. G., Chireykin L. V. i dr. *Analiz variablnosti serdechnogo ritma pri ispolzovanii razlichnykh elektrokardiograficheskikh system* (Analysis of heart rate variability when using various electrocardiographic systems), *Vestnik Aritmologii*, 2001, no. 24, pp. 65–86 (in Russian).
3. Rangayyan R. M. *Analiz biomeditsinskih signalov. Prakticheskiy podhod* (Analysis of biomedical signals. Practical approach), Moscow, Fizmatlit, 2007, 440 p. (in Russian).
4. Baevskiy R. M., Kirillov O. I., Kletskin S. Z. *Matematicheskiy analiz izmereniy serdechnogo ritma pri stresse* (Mathematical analysis of heart rate measurements under stress) Moscow, Nauka, 1984, 219 p. (in Russian).
5. Istomina T. V., Lomtev E. A., Sotnikova O. A. *Haoticheskaya dinamika v narusheniyah serdechnogo ritma* (Chaotic dynamics in disorders of the heart rhythm), *Meditsinskaya Tehnika*, 1999, no.1, pp. 34–35 (in Russian).
6. Coldberger A. L., Rigney D. R., West B. J. Chaos and fractals in human physiology, *Scientific American*, 1990, no. 2, pp. 35–41.
7. Gorban I. I. *Statisticheski neustoychivyye protsessy: svyaz s flikker, neravnovesnyimi, fraktalnymi i tsvetnyimi shumami* (Statistically unstable processes: connection with flicker, nonequilibrium, fractal and color noises), *Izv. VUZov "Radioelektronika"*, 2012, vol. 55, no. 3, pp. 3–16 (in Russian).
8. Parkhutik V., Rayon E., Ferrer C., Timashev S., Vstovsky G. Forecasting of electrical breakdown in porous silicon using flicker-noise spectroscopy, *Physica Status Solidi (a)*, 2003, vol. 197, pp. 471–475.
9. Timashev S. F. *Flikker-shumovaya spektroskopiya: informatsiya v haoticheskikh signalah* (Flicker-noise spectroscopy: information in chaotic signals), Moscow, Fizmatlit, 2007, 248 p. (in Russian).
10. Timashev S. F., Demin S. A., Panishev O. Yu., Polyakov Yu. S., Kaplan A. Ya., Nefedev Yu. A. *Flikker-shumovaya spektroskopiya kak "pribor" dlya individualnoy meditsiny budushchego* (Flicker-noise spectroscopy as an "instrument" for individual medicine of the future), *"Uchenyie zapiski" Kazanskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ser. "Fiziko-matematicheskie nauki"*, 2012, vol. 154, no. 4, pp. 161–177 (in Russian).
11. Abdullaev N. T., Dyishin O. A., Gasankuliyeva M. M. *Flikker-shumovaya spektroskopiya elektrokardiograficheskikh signalov* (Flicker-noise spectroscopy of electrocardiographic signals), *Meditsinskaya Tehnika*, 2015, no. 5, pp. 12–15 (in Russian).
12. Abdullaev N. T., Dyishin O. A., Gasankuliyeva M. M. *Parametrizatsiya regulyarnoy sostavlyayushey EKG-signalu dlya vviyavleniya kriticheskikh sostoyaniy serdechno-sosudistoy sistemyi* (Parametrization of the regular component of the ECG signal for the detection of critical states of the cardiovascular system), *Meditsinskaya Tehnika*, 2016, no. 3, pp. 15–18 (in Russian).
13. Haykin S. *Neyronnyie seti: polnyi kurs* (Neural networks: full course), Moscow, Publishing house "Vilyams", 2006, 1104 p.
14. Ezhov A. I., Chechetkin V. V. *Neyronnyie seti v meditsine* (Neural networks in medicine), *Otkrytyie sistemyi*. 1997, no. 4, pp. 34–37 (in Russian).
15. Sushkova L. T., Isakov R. V., Almabruk M., Lukyanova Yu. A. *Rezultaty issledovaniya neyronnyih setey v zadachah raspoznvaniya patologicheskikh izmeneniy elektricheskoy aktivnosti serdtsa* (Results of the study of neural networks in problems of recognition of pathological changes in the electrical activity of the heart), *Biomeditsinskaya Radioelektronika*, 2010, no. 9, pp. 9–13 (in Russian).
16. Abdullaev N. T., Dyishin O. A., Gasankuliyeva M. M. *Informatsionnyie parametry i fluktuatsionnaya dinamika elektrokardiogramm pri flikker-shumovoy spektroskopii* (Information parameters and fluctuation dynamics of electrocardiograms in flicker-noise spectroscopy), *Informatsionnyie Tehnologii*, 2016, no. 1, pp. 72–75 (in Russian).