

Мультифрактальный анализ variability сердечного ритма для задач диагностики аритмий

К. С. Старченкова¹, Л. А. Манило²

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹karinasmbatovna@gmail.com, ²lmanilo@yandex.ru

Аннотация. Последние годы методы нелинейной динамики активно применяются для анализа и прогнозирования временных рядов, таких, в частности, как сердечный ритм, представленный последовательностью кардиоинтервалов. Одним из методов анализа и прогнозирования временных рядов является фрактальный анализ. Благодаря использованию этого метода можно найти закономерности во временных рядах, на первый взгляд являющихся совершенно случайными. В то же время оказывается, что некоторые отклонения в структуре временного ряда, являющиеся диагностически важными, связаны с нелинейными свойствами анализируемого сигнала. В работе исследуется применение фрактального анализа к задаче распознавания трех видов сердечного ритма: нормального ритма, частой экстрасистолии и мерцательной аритмии (фибрилляция предсердий). В качестве основных методов фрактального анализа были выбраны: расчет показателя Херста и мультифрактальный детрендрованный флуктуационный анализ.

Ключевые слова - сердечный ритм, показатель Херста, мультифрактальный детрендрованный флуктуационный анализ, мультифрактальный спектр

I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день электрокардиография (ЭКГ) играет большую роль в диагностике острых и хронических заболеваний сердца, а также выявлении внесердечных заболеваний. Структурные изменения на ЭКГ часто можно заметить визуально при ручной обработке сигналов, но степень и характер этих изменений часто трудно идентифицировать. В связи с этим в последние годы особый интерес представляет разработка и применение новых методов автоматического анализа биосигналов. Классическими и широко используемыми методами оценки сложной ритмической структуры ЭКГ являются измерения во временной области (статистические показатели, геометрические методы, корреляционная ритмография) и спектральный анализ variability сердечного ритма (ВСР) [1]. Существует множество научных данных о прогностической значимости обычных измерений ВСР у пациентов с различными состояниями, особенно при наличии мерцательной аритмии. Но обычные измерения ВСР не могут выявить тонкие изменения во временной структуре регуляции ритма, поэтому было разработано несколько нелинейных методов анализа динамики сердечного ритма. Одним из таких методов является фрактальный анализ, важным

достоинством которого является возможность, как графической оценки структуры сигнала, так и определение его количественных характеристик, благодаря которым можно предсказать поведение биологической системы в будущем. Как известно ритм сердца часто имеет масштабно-инвариантную структуру [2], то есть его структура повторяется на отдельных подинтервалах, поэтому еще одним из плюсов применения фрактального анализа является возможность оценки показателя степенного закона, H , который определяет конкретный вид масштабно-инвариантной структуры анализируемого сигнала.

Для анализа сигналов сердечного ритма в настоящей работе были использованы одни из основных методов фрактального анализа сигналов - метод нормируемого размаха (R/S-анализ) и мультифрактальный детрендрованный флуктуационный анализ [3-4].

Целью данной работы является изучение нелинейной природы трех видов сердечного ритма: нормального ритма, частой экстрасистолии и мерцательной аритмии. Показатели нелинейности могут быть использованы для интегральной оценки режима регуляции сердечного ритма, что важно для контроля функционального состояния организма, а также для диагностики нарушений сердечного ритма.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: произведена разработка программно-алгоритмического комплекса для расчета показателя Херста с помощью R/S-анализа и построения фрактального спектра с использованием мультифрактального детрендрованного флуктуационного анализа; показана возможность применения предложенных методов в качестве оценки фрактальности трех видов сердечного ритма.

II. МЕТОД НОРМИРУЕМОГО РАЗМАХА (R/S-АНАЛИЗ)

Показатель Херста – это мера, которая активно используется для оценки самоподобия и корреляционных свойств временных рядов. Также показатель Херста используется для определения наличия или отсутствия степенной зависимости сигнала. При анализе динамики сердечного ритма показатель Херста может быть применен для характеристики нестационарного поведения эпизодов ритмограммы [5].

Показатель Херста является безразмерной величиной, которая выражается в виде отношения размаха накопленного отклонения от среднего значения к среднеквадратическому отклонению [6].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00215, <https://rscf.ru/project/23-21-00215/>

Рассмотрим алгоритм расчета показателя Херста с помощью R/S анализа.

1. Находим среднее значение ряда показателей $\langle \varepsilon \rangle$ за N временных отсчетов:

$$\langle \varepsilon \rangle_N = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \varepsilon(n), \quad (1)$$

где ε – последовательные значения ряда.

2. Вычисляем накопившиеся отклонения $X(n, N)$, от его среднего значения $\langle \varepsilon \rangle_N$:

$$X(n, N) = \sum_{p=1}^n \{\varepsilon(p) - \langle \varepsilon \rangle_N\}. \quad (2)$$

3. Производим расчет размаха отклонений:

$$R(N) = \max_{1 \leq n \leq N} X(n, N) - \min_{1 \leq n \leq N} X(n, N).$$

Ясно, что размах зависит от рассматриваемого значения N , и мы ожидаем, что R растет с N . Стандартное отклонение $S(N)$ вычисляем по формуле:

$$S(N) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \{\varepsilon(n) - \langle \varepsilon \rangle_N\}^2}.$$

4. Для большинства временных рядов, наблюдаемый нормированный размах R/S описывается эмпирическим соотношением:

$$\frac{R}{S} = (\alpha N)^H,$$

где H – показатель Херста, α – некоторая постоянная.

5. Показатель Херста может быть приближен посредством построения зависимости $\log(R/S)$ от $\log N$ и вычисления наклона через простую регрессию, полученную методом наименьших квадратов. Основным является следующее уравнение:

$$\log(R/S) = \log c + H \log N$$

где H может принимать значения от 0 до 1. Это отношение должно асимптотически стремиться к 0.5 при $N \rightarrow \infty$. Чем ближе H к 0.5, тем более зашумлен ряд и тем менее выражен его тренд.

Значения $0.5 < H < 1$ – это персистентный временной ряд, характеризующийся эффектами долговременной памяти. Когда $0 < H < 0.5$ – это антиперсистентный временной ряд, характеризующийся краткосрочной памятью. Отношение R/S является безразмерной величиной, поэтому его можно использовать для сравнения размахов различных временных рядов.

III. МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫЙ ФЛУКТУАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

Монофрактальные и мультифрактальные структуры биомедицинского сигнала представляют собой особый вид масштабно-инвариантных структур. Чаще всего монофрактальная структура определяется одним степенным показателем и предполагает, что масштабная инвариантность не зависит от времени и пространства. Однако часто возникают пространственные и временные вариации в масштабно-инвариантной структуре биомедицинского сигнала. Эти пространственные и временные вариации указывают на мультифрактальную

структуру биомедицинского сигнала, которая определяется мультифрактальным спектром степенных показателей.

В этом разделе исследования проводится мультифрактальный анализ с помощью мультифрактального детрендрованного флуктуационного анализа (МФДФА) [7]. С помощью МФДФА биологический сигнал можно оценить, как численно, так и визуально. В качестве визуального анализа рассматривается построение модельного спектра сигнала. Наряду с визуальной оценкой спектра по нему можно определить фрактальный показатель Херста, ширину спектра и значения \min и \max флуктуаций. Пример спектра с обозначением характерных фрактальных показателей представлен на рис. 1.

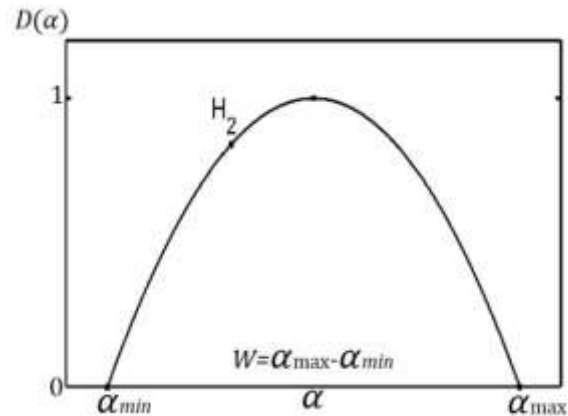


Рис. 1. Модельный спектр

Алгоритм вычисления заключается в построении ряда $y(t) = \sum_{i=1}^t x(t)$ для исходного сигнала $x(t)$. Полученный ряд делим на сегменты длины s , число которых равно $N_s = [N/s]$. Затем для каждого сегмента v определяем локальный полиномиальный тренд $y_v(i)$, степень которого выбирается таким образом, чтобы обеспечить интерполяцию с ошибкой, не превышающей заданное значение:

$$y_v(i) = \sum_{k=0}^m C_k i^{m-k},$$

где C_k – корреляционный интеграл; m – степень полинома (обычно $m=2$). На следующем шаге определяем момент дисперсии

$$F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (y\{(v-1)s+i\} - y_v(i))^2, \quad (3)$$

и значения флуктуационной функции

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{v=1}^{N_s} [F^2(v, s)]^{\frac{q}{2}} \right\}^{\frac{1}{q}}. \quad (4)$$

Если исследуемый ряд обладает фрактальными свойствами, то функция $F_q(s)$ представляется степенной зависимостью $F_q(s) \approx s^{h(q)}$, где $h(q)$ – обобщенный показатель Херста. Из определений (3) и (4) следует, что при $q=2$ этот показатель сводится к значению H [8, 9].

Мультифрактальное множество характеризуется скейлинговой экспонентой $\tau(q)$. Эта функция

показывает, насколько неоднородным является исследуемое множество точек.

Обобщенный показатель Херста связан с функцией $\tau(q)$ соотношением: $\tau(q) = qh(q) - 1$. Для самоподобного процесса функция $\tau(q)$ линейна.

Одной из важных характеристик мультифрактальных свойств является функция мультифрактального спектра $D(\alpha)$. Величина α_i представляет собой показатель сингулярности в точке x_i . Для самоподобного процесса все α_i одинаковы и равны параметру H . Функция мультифрактального спектра $D(\alpha)$ характеризует распределение вероятностей различных значений α_i . Переход от переменных $\{q, \tau(q)\}$ к $\{\alpha, D(\alpha)\}$ осуществляется с помощью преобразования Лежандра:

$$\left\{ \alpha = \frac{d\tau}{dq}; D(\alpha) = q \frac{d\tau}{dq} - \tau \right\}.$$

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследования использовались реальные сигналы нормального ритма, частой экстрасистолии и мерцательной аритмии из баз данных: MIT-BIH Atrial Fibrillation Database, MIT-BIH Arrhythmia Database и Normal Sinus Rhythm RR Interval Database. Каждая группа ритма состояла из пятидесяти реализаций длительностью триста кардиоциклов. На первом этапе с помощью R/S-анализа были рассчитаны значения показателя Херста. Результат статистической обработки полученных экспериментальных данных представлен в табл. I.

ТАБЛИЦА I. ПОКАЗАТЕЛЬ ХЕРСТА КАРДИОИНТЕРВАЛОГРАММ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

Сердечный ритм	Нормальный ритм	Частая экстрасистолия	Мерцательная аритмия
Показатель Херста	0.81±0.06	0.65±0.11	0.39±0.05

Исходя из полученных данных можно заключить, что показатели нормального ритма превышают значение $H = 0.5$. Это означает, что нормальный сердечный ритм является персистентным временным рядом и соответственно обладает свойством долговременной памяти, что указывает на его регулярность. Показатели частой экстрасистолии также превышают значение $H =$

0.5, но они значительно отличаются от показателей нормального ритма, благодаря чему можно произвести разделение этих двух классов. Показатели Херста мерцательной аритмии находятся в диапазоне от 0 до 0.5, что означает антиперсистентность системы, т. е. ее более частое изменение.

На следующем шаге рассмотрим влияние нарушений сердечного ритма на мультифрактальные свойства исследуемых временных рядов. Для этого с помощью метода МФДФА построим и проанализируем спектры сигналов, а также рассчитаем обобщенный показатель Херста $h(q)$ и характерные мультифрактальные величины. Для проведения анализа также будем использовать предложенную ранее выборку сигналов. Графики мультифрактального спектра для трех видов сердечного ритма представлены на рис. 2. Результат статистической обработки характерных мультифрактальных величин представлен в табл. II.

ТАБЛИЦА II. ХАРАКТЕРНЫЕ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

Сигнал	Ширина спектра, W	Показатель Херста, H_2	Наименьшие и наибольшие значения флуктуаций	
			α_{min}	α_{max}
Нормальный ритм	1.35±0.37	0.83±0.01	-	1.4±0.10
Частая экстрасистолия	0.86±0.28	0.74±0.03	-	0.8±0.20
Мерцательная аритмия	0.31±0.22	0.63±0.03	0.10±0.10	0.7±0.10

Значение ширины спектра характеризует разброс флуктуаций в спектре. В связи с тем, что фрактальные показатели спектра имеют численные значения, они могут быть применимы для оценки самоподобия сигналов сердечного ритма, а также с их помощью можно характеризовать функциональные изменения в организме. По полученным спектрам видно, что ширина мультифрактального спектра нормального ритма значительно больше, чем у других видов ритмов, а также, что при увеличении хаотичности в сигнале спектр смещается по оси абсцисс вправо. На следующем шаге рассмотрим влияние сердечного ритма на обобщенный показатель Херста. Соответствующие графики изображены на рис. 3.

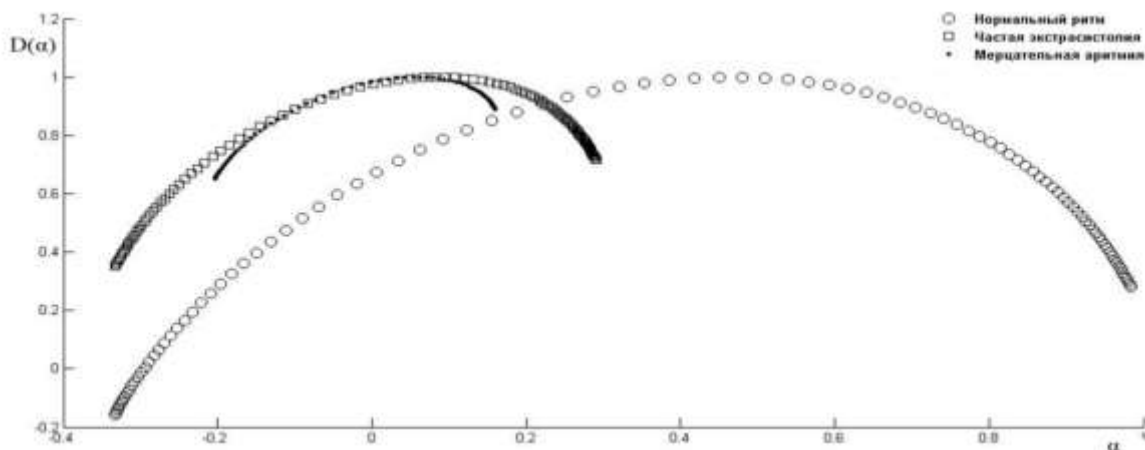


Рис. 2. Мультифрактальные спектры трех видов сердечного ритма

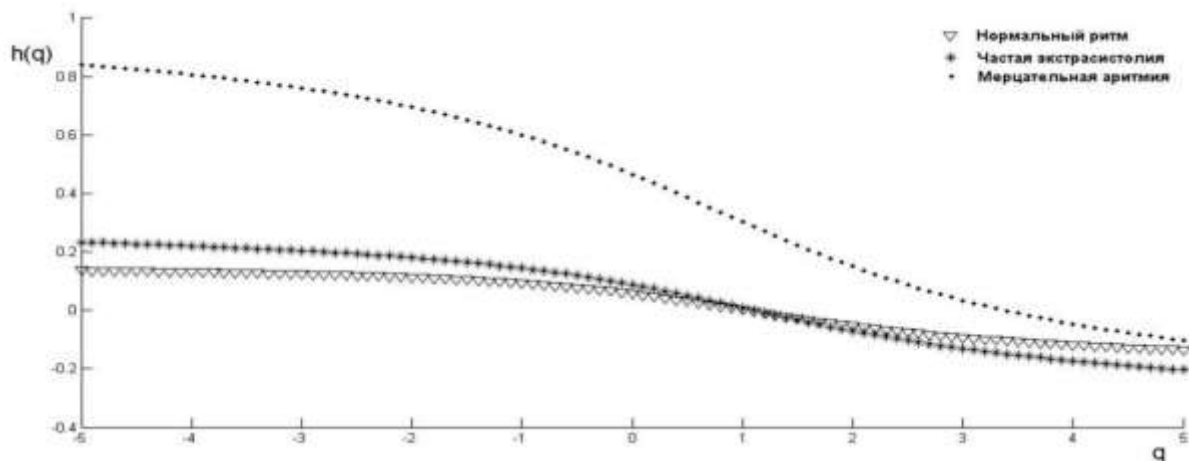


Рис. 3. Обобщенный показатель Херста

Наличие нелинейной зависимости у всех функций говорит о том, что показатель Херста меняется при изменении параметра q . По графику обобщенного показателя Херста видно, что все сигналы обладают мультифрактальными свойствами, причем при мерцательной аритмии они наиболее выражены, а при нормальном ритме выражены слабее.

Полученные в ходе экспериментов данные могут быть использованы для более глубокого понимания модели регуляции сердечного ритма в норме и при наличии нарушений, а также в задачах распознавания аритмий.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе было проведено исследование на 150-ти реализациях трех видов сердечного ритма: нормальный ритм, частая экстрасистолия и мерцательная аритмия. Методом нормируемого размаха был рассчитан показатель Херста, а с помощью мультифрактального детрендрованного флуктуационного анализа для каждого класса ритма были построены фрактальные спектры. Полученные в результате выполненных экспериментов спектры были оценены, как визуально, так и количественно.

На основании проведенных исследований нашла подтверждение гипотеза о том, что система регуляции сердечного ритма и, соответственно сигналы ритмограммы представляют собой сложную динамическую систему. Степень сложности описывается мерой мультифрактальности сигнала (шириной мультифрактального спектра).

Ширина мультифрактального спектра может служить индикатором измененных состояний сердечного ритма. Характеризовать состояние сердечного ритма можно по величине смещения спектра

$D(\alpha)_{min}$ при переходе от нормального ритма к аритмиям. В целом анализ спектра показывает, что ритмограмма человека имеет выраженные мультифрактальные свойства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин Л.В. и др. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации). // Вестник аритмологии, № 24, 2001. с. 65-87.
- [2] Антипов О.И., Мачихин В.А., Никушин Р.В. Корреляционный метод анализа электроэнцефалограммы // Материалы XVII Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий коммуникации» ПТИТТ-2016. 22-24 ноября. Самара. ПГУТИ
- [3] Хачатрян К.С., Манило Л.А., «Метод анализа псевдофазового портрета в задаче распознавания биомедицинских сигналов». // Биотехносфера вып. №5/47/2016, Санкт-Петербург, АО «Изд-во «Политехника», 2016.
- [4] Старченкова К.С. Показатель Хёрста в анализе ритмограмм сердечного ритма // Биотехносфера. 2019, № 6, с. 37–40. DOI 10.25960/bts.2019.6.37
- [5] Hurst H.E. Methods of using long-term storage in reservoirs. // Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London, 1955, Part 1. pp. 519–577.
- [6] Кириченко Л.О. Сравнительный мультифрактальный анализ временных рядов методами детрендрованного флуктуационного анализа и максимумов модулей вейвлет-преобразования // Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. АСУ и приборы автоматки. Х.: Изд-во ХНУРЭ, 2011. Вып. 157. С. 66–77.
- [7] Kantelhardt J.W. Fractal and Multifractal Time Series. 2008. <http://arxiv.org/abs/0804.0747>
- [8] Кириченко Л.О. Исследование выборочных характеристик, полученных методом мультифрактального флуктуационного анализа // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка: зб. наук. пр. 2011. № 54. С.101–111
- [9] В.С. Кубланов, В.И. Борисов, А.Ю. Долганов. К88 Анализ биомедицинских сигналов в среде MATLAB: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 120 с.