

АНАЛИЗ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ МЕТОДА ОЦЕНКИ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

© 2014 А.А. Федотов, А.С. Акулова, С.А. Акулов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Статья посвящена анализу случайных погрешностей показателей variability сердечного ритма. В статье приведены схемы вычисления показателя Хёрста на основе метода нормированного размаха и коэффициента флуктуации с помощью флуктуационного анализа с устранением трендов. Оценена зависимость относительной погрешности измерения показателей variability сердечного ритма от величины абсолютной погрешности определения длительности кардиоинтервалов. Сделан вывод о чувствительности использованных в статье показателей variability сердечного ритма к погрешности измерения длительностей кардиоинтервалов.

Триангулярный индекс, показатель Хёрста, коэффициент флуктуации, модельная последовательность, характеристическая точка, случайная погрешность.

Оценка variability сердечного ритма (BCP) является современной и эффективной методикой диагностики состояния организма, т.к. она отражает работу сердечно-сосудистой системы и работу механизмов регуляции целостного организма [1]. Под variability сердечного ритма принято понимать изменчивость продолжительности интервалов R-R последовательных циклов сердечных сокращений за определённый промежуток времени [2].

В качестве показателей BCP в данной статье рассмотрены:

1) $SDNN$ – среднеквадратичное отклонение длительностей КИ (выражается в мс):

$$SDNN = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2},$$

где X_i – значение длительности i -го КИ, \bar{X} – среднее значение длительности КИ, N – размер исследуемой выборки КИ;

2) триангулярный индекс HRV вычисляется как $HRV = \frac{N}{A_m}$,

где A_m – амплитуда моды распределения КИ, N – размер выборки КИ;

3) показатель Хёрста H , определяемый на основе применения метода нормированного размаха (RS-анализ) и характеризующий отношение силы тренда (детерминированный фактор) к уровню шума (случайный фактор);

4) коэффициент флуктуации α ,

определяемый с помощью флуктуационного анализа с устранением трендов (в англоязычной литературе DFA: Detrended Fluctuation Analysis). Метод DFA позволяет проводить изучение структуры различных процессов, в том числе и нестационарных, с точки зрения статистического самоподобия.

Вычисление показателя Хёрста производится по следующей схеме [3]:

1) на первом этапе вычисляется набор отклонений Y от среднего значения в пределах изменяющегося окна:

$$Y_{M,K} = \sum_{i=1}^M (X_i - \bar{X}_K),$$

где X_i – значение длительности i -го КИ; K – ширина окна, в пределах которого вычисляется отклонение от среднего, изменяющаяся от 2 до значения, равного размеру исходной выборки КИ X ; M – переменная, изменяющаяся от 1 до $K-1$; \bar{X}_K – среднее значение длительности КИ, определенное по K элементам. На каждой итерации вычисления (для каждого значения K) получается $K-1$ значений $Y_{M,K}$;

2) далее для каждого значения K вычисляется величина размаха отклонения R : $R_K = \max(Y_{M,K}) - \min(Y_{M,K})$;

3) на следующем этапе размах отклонения R_K нормируется делением на стандартное отклонение S_K , которое вычисляется по K элементам последовательности КИ;

4) далее строится график зависимости $\log(R/S)$ от $\log(K)$;

5) полученная логарифмическая зависимость аппроксимируется линейным полиномом и определяется угол наклона аппроксимированного графика к оси абсцисс. Тангенс данного угла наклона численно равен значению показателя Хёрста H .

Алгоритм вычисления коэффициента флуктуации α включает в себя следующие этапы [4]:

1) на первом этапе из временной последовательности длительностей КИ формируется кумулятивная сумма

$$W_t = \sum_{i=1}^t X_i, \text{ где: } X_i - \text{значение длительности}$$

i -го КИ, t – переменная, изменяющаяся от 1 до величины размера исходной выборки КИ X ;

2) на следующем этапе кумулятивная сумма W_t разбивается на временные окна равного размера L ; для каждого временного окна составляется интерполяционный полином, в случае использования метода DFA первого порядка это линейный полином Z ;

3) затем для каждого значения размера временного окна L вычисляется среднеквадратичное отклонение

$$F = \left[\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L (W_{t_j} - Z_j)^2 \right]^{0.5};$$

4) этапы вычисления 2 и 3 повторяются при различных размерах временного окна L ;

5) определяют показатель (коэффициент флуктуации первого порядка α) зависимости $F(L)$ как отношение логарифмов изменения F в зависимости от изменения L .

Основным источником погрешности формирования последовательности длительностей КИ, оказывающих влияние на определение параметров ВСП, является ошибка измерения длительности КИ.

Исследование влияния погрешности определения длительности КИ на погрешности определения показателей ВСП осуществлялось путём формирования модельных последовательностей КИ, соответствующих структуре сердечного ритма человека [5]. Для описания модельной последовательно

сти КИ использовалась следующая зависимость:

$$RR(n) = RR_0 + \gamma \cdot \xi(n),$$

где RR_0 – среднее значение длительностей КИ из диапазона физиологической адекватности: 500...2000 мс; γ – коэффициент активности регуляторных процессов; $\xi(n)$ – массив случайных чисел, распределённых по нормальному закону с нулевым средним и единичным среднеквадратичным отклонением.

Для анализа влияния погрешности измерения длительностей КИ на погрешность определения показателей ВСП в модельную последовательность КИ вводится величина случайной погрешности измерений с заданными характеристиками нормального распределения (математическое ожидание равно нулю, среднеквадратичное отклонение σ определялось величиной вносимой погрешности, количество выборок $N=10^4$).

Погрешность определения показателей ВСП определялась как относительное отклонение показателей модельной последовательности КИ от показателей, полученных при добавлении случайной погрешности измерения в значения длительностей КИ.

Для оценки погрешности измерения длительностей КИ использовались квантильные характеристики погрешностей, при которых значение погрешности с заданной доверительной вероятностью P находится внутри интервала неопределённости $\pm \Delta_r$. При $P=0,9$ абсолютная погрешность определяется как: $\Delta_{0,9} = \pm 1,6 \cdot \sigma$, где σ – среднеквадратичное отклонение величины вносимой случайной погрешности [6]. Выбранное значение доверительной вероятности обусловлено необходимостью обеспечить инвариантность зависимости между величиной абсолютной погрешности измерения длительностей КИ и среднеквадратичным отклонением от вида закона распределения случайной погрешности, что обеспечивает универсальность проводимого анализа погрешностей.

На рис. 1 приведены зависимости изменения относительной погрешности определения показателей ВСП δ от величины абсолютной погрешности измерения длительностей КИ Δ (на рисунке: 1 – коэффициент

флуктуации α ; 2 – SDNN; 3 – показатель Хёрста H ; 4 – HRV). Зависимости получены при следующих параметрах модельной последовательности длительностей КИ:

$RR_0=1000$ мс; $\gamma=30$ мс; интервал группирования гистограммы распределения длительностей КИ при вычислении геометрического показателя HRV был равен 8 мс.

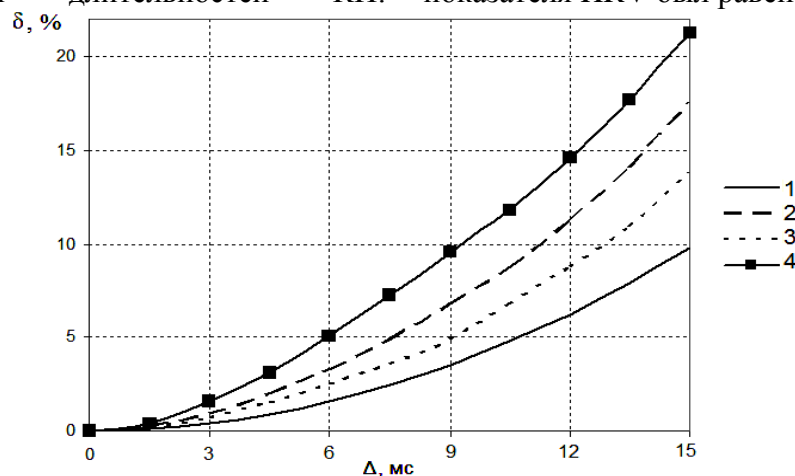


Рис. 1. Зависимости определения относительной погрешности измерения показателей ВСП δ от величины абсолютной погрешности измерения длительностей КИ

Большинство современных аппаратно-программных методов обнаружения характеристических точек биосигналов сердечного ритма обеспечивают методическую погрешность измерения длительностей КИ в условиях присутствия помех и шумов различной природы возникновения и интенсивности в диапазоне 6...9 мс [7, 8]. Для указанного диапазона погрешностей измерения длительностей КИ относительные погрешности определения рассматриваемых показателей ВСП не превышают 10%.

Коэффициент флуктуации, определяемый на основе применения флуктуационного анализа с устранением тренда, обладает наименьшей чувствительностью к погрешности измерения длительностей КИ, что позволяет рекомендовать флуктуационный анализ сердечного ритма к использованию в портативных кардиомониторах, к которым предъявляются жесткие требования по экономичности и габаритам при невысокой точности измерения длительностей КИ.

Библиографический список

1. Task Force of the European Society of Cardiology and North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use // *Circulation*. 1996. Vol. 93 (5). P. 1043-1065.
2. Баевский Р.М., Иванов Г.Г. Вариабельность сердечного ритма: теоретические аспекты и возможности клинического применения. М.: Медицина, 2000. 295 с.
3. Бутаков В., Граковский А. Оценка уровня стохастичности временных рядов произвольного происхождения при помощи показателя Хёрста // *Computer Modelling and New Technologies*. 2005. Vol. 9 (2). P. 27-32.
4. Peng C. K. Mosaic organization of DNA nucleotides // *Physiology Review E*. 1994. Vol. 49. P. 1685-1689.
5. Федотов А.А. Погрешности определения показателей нелинейной динамики сердечного ритма // *Измерительная техника*. 2013. № 5. С. 39-42.
6. Новицкий П. В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 304 с.
7. Калакутский Л. И., Федотов А.А. Погрешности определения спектральных показателей variability пульсового ритма // *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2011. № 7. С. 61-65.

8. Friesen G.M. et al. A comparison of the noise sensitivity of nine QRS detection algorithms // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 1990. Vol. 37 (1). P. 85–98.

Информация об авторах

Федотов Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры лазерных и биотехнических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: fedoaleks@yandex.ru. Область научных интересов: моделирование биотехнических систем, цифровая обработка биосигналов, измерительные преобразователи биологической информации.

Акулов Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры лазерных и биотехнических систем, Самарский государственный аэрокосмический универ-

ситет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sakulov1981@mail.ru. Область научных интересов: моделирование биотехнических систем, исследование биоэлектрического импеданса, методы и средства диагностики сердечно-сосудистой системы человека.

Акулова Анна Сергеевна, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: akulova_as@mail.ru. Область научных интересов: моделирование биотехнических систем, исследование биоэлектрической активности сердца.

ANALYSIS OF RANDOM UNCERTAINTIES OF HEART RATE VARIABILITY

© 2014 A.S. Akulova, A.A. Fedotov, S.A. Akulov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The article is devoted to analysis of random uncertainties of heart rate variability indices. The article contains the algorithm of Hurst indicator calculation based on RS-method and algorithm of calculation of fluctuation coefficient based on Detrended Fluctuation Analysis. The dependence between relative uncertainty of heart rate variability indices and absolute uncertainty of measurement of beat-to-beat intervals is estimated. The conclusion about sensitivity of heart rate variability indices used in the article to the uncertainty of measurement of beat-to-beat intervals is made.

Triangular index, Hurst indicator, fluctuation coefficient, model consequence, fiducial point, random uncertainty.

References

1. Task Force of the European Society of Cardiology and North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use // Circulation. 1996. Vol. 93 (5). P. 1043-1065.
2. Baevskiy R.M., Ivanov G.G. Variabelnost serdechnogo ritma: teoreticheskie aspekty i vozmoshnosti klinicheskogo primeneniya. [Heart rate variability: theoretical aspects and clinical applications]. Moscow: Medicina [Medicine], 2000. 295 p. (In Russ.)
3. Butakov V., Grakovskiy A. Ocenka urovnya stochastichnosti vremennykh ryadov proizvolnogo proischozheniya pri pomoshi pokazatelya Hersta [Estimation of stochastic level of time series of arbitrary origin by using the Hurst index] // Computer Modelling and New Technologies. – 2005. – Vol. 9 (2). – P. 27-32. (In Russ.)

4. Peng C.K. Mosaic organization of DNA nucleotides // *Physiology Review E.* – 1994. – Vol. 49. – P. 1685–1689.
5. Fedotov A.A. Errors in the determination of indices of the nonlinear dynamics of the heart rate // *Springer: Measurement Techniques.* – 2013. – Vol. 56, Issue 5. – P. 524-528. (In Russ.)
6. Novitskiy P.V., Zograf I.A. Estimation of accuracy of measurement results. L.: Energoatomizdat [Energetics and atomic publisher], 1991. 304 p.
7. Kalakutskiy L.I., Fedotov A.A. Pogreshnosti opredeleniya spectralnykh pokazateley variabelnosti pulsovogo ritma [Uncertainty of determination of spectral parameters of pulse rate variability] // *Biomedicinskaya radioelektronika.* 2011 Vol. 7. P. 61–65.
8. Friesen G.M. et al. A comparison of the noise sensitivity of nine QRS detection algorithms // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering.* 1990. Vol. 37 (1). P. 85–98.

About the authors

Fedotov Aleksandr Aleksandrovich, Candidate of Sciences (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Laser and Bioengineering Systems, E-mail: fedo-aleks@yandex.ru. Area of research: modeling of bioengineering systems, biosignal processing, transducers of biological information.

Akulov Sergey Anatolievich, Candidate of Sciences (Technical Sciences), Associate

Professor of the Department of Laser and Bioengineering Systems. E-mail: sakulov1981@mail.ru. Area of research: modeling of bioengineering systems, bioelectrical impedance, diagnostics of cardiovascular system.

Akulova Anna Sergeevna, Second Year Graduate Student, E-mail: akulova_as@mail.ru. Area of research: modeling of bioengineering systems, bioelectrical heart activity.