
КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

BRIEF PAPERS

УДК 004.93

DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-12-1082-1086

ПРОСТРАНСТВО ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ЭПИЗОДОВ НАРУШЕНИЯ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

Б. К. Акопян*, Т. М. Татарникова

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

* *akopyan.bella@yandex.ru*

Аннотация. Показана актуальность задачи выбора информативных признаков, позволяющих обнаружить возможные нарушения сердечного ритма и осуществлять классификацию аритмий. Предлагается использовать восемь информативных признаков электрокардиокомплекса. Показано, что эти признаки можно привести к двум агрегированным показателям. Исследование проведено на материалах отведения II открытой верифицированной базы данных MIT-BIH Arrhythmia DB и базе данных многоканальных ЭКГ Санкт-Петербургского Института кардиологической техники „ИНКАРТ“. Результаты классификации методом опорных векторов демонстрируют обоснованность выбранного пространства информативных признаков для классификации различных состояний сердечного ритма.

Ключевые слова: *сердечно-сосудистые заболевания, профилактика, электрокардиограмма, классификация, информативные признаки*

Ссылка для цитирования: *Акопян Б. К., Татарникова Т. М. Пространство информативных признаков для классификации эпизодов нарушения сердечного ритма // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 12. С. 1082–1086. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-12-1082-1086.*

SPACE OF INFORMATIVE FEATURES FOR CLASSIFYING EPISODES OF CARDIAC ARRHYTHMIA

B. K. Akopyan*, T. M. Tatarnikova

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

* *akopyan.bella@yandex.ru*

Abstract. The relevance of the problem of selecting informative features that allow detecting possible cardiac arrhythmias and classifying arrhythmias is shown. It is proposed to use eight informative features of the electrocardiocomplex. It is shown that these features can be reduced to two aggregated indicators. The study was conducted on the materials of lead II of the open verified MIT-BIH Arrhythmia DB database and the database of multichannel ECGs of the St. Petersburg Institute of Cardiology Technology "INKART". The results of the classification using the support vector method demonstrate the validity of the selected space of informative features for classifying various states of the cardiac rhythm.

Keywords: *cardiovascular diseases, prevention, electrocardiogram, classification, informative signs*

For citation: *Akopyan B. K., Tatarnikova T. M. Space of informative features for classifying episodes of cardiac arrhythmia // Journal of Instrument Engineering. 2024. Vol. 67, N 12. P. 1082–1086 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-12-1082-1086.*

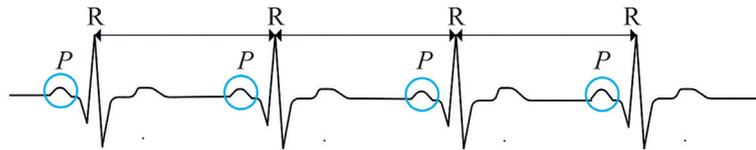
Необходимость внедрения новых эффективных технологий диагностики, лечения и профилактики сердечно-сосудистых заболеваний отражена в государственных программах развития

здравоохранения, в частности в Региональной программе Санкт-Петербурга „Борьба с сердечно-сосудистыми заболеваниями“ на 2019–2024 гг. [1].

Современная клиническая экспресс-диагностика состояния сердечно-сосудистой системы, которая включает в себя анализ электрокардиограммы и оценку артериального давления, характеризуется широким применением цифровых вычислительных устройств со встроенными алгоритмами автоматической обработки, анализа и интерпретации [2, 3]. Однако подавляющее большинство подобных алгоритмов демонстрируют низкие показатели эффективности при анализе состояния обследуемых с нарушениями сердечного ритма, например, при политопной экстрасистолии [4]. В частности, остаются открытыми вопросы формирования пространства информативных признаков, на основании которых может решаться задача классификации различных состояний сердечного ритма.

Постановка задачи классификации нарушения ритма по сигналу электрокардиограммы. Электрокардиограмма (ЭКГ) представляет собой запись отсчетов электрокардиосигнала. К информативным сегментам ЭКГ относятся зубцы, сегменты и интервалы [5]. Зубцы отражают работу определенных участков сердца и внешне представляют собой набор пиков и впадин [6]. Сегмент — отрезок изоэлектрической линии, заключенный между двумя соседними зубцами; в случае ЭКГ нормальной формы он не искажен и не смещен относительно изолинии [7].

Для оценки сердечного ритма традиционно выполняется измерение RR-интервалов (на рисунке представлена электрокардиограмма здорового человека).



Постановка задачи выглядит следующим образом: по опорной точке R_i определяются информативные признаки так, что каждый эпизод в записи описан в общем случае набором из n информативных признаков $\Theta_i = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$. Известно, что истинное состояние кардиоцикла может быть отнесено только к одному из M классов, представленных множеством $\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_M\}$. Необходимо разделить n -мерное пространство информативных признаков на M кластеров.

Сложность задачи многоклассовой классификации кардиоциклов по ЭКГ заключается в присущих биомедицинским сигналам разнообразию и изменчивости признаков нарушений ритма. В связи с этим с ростом числа классифицируемых нарушений ритма возрастет и размерность пространства информативных признаков. Аритмические кардиоциклы отличаются от нормальных длительностью RR-интервала и формой полезного сигнала кардиограммы.

Пространство информативных признаков для классификации различных состояний сердечного ритма. В работах [8–10] использовались следующие признаки.

1. Коэффициент эксцесса i -го R-зубца γ_i :

$$q_1 = \gamma_i = \frac{\mu_4}{\sigma_s^4}, \mu_4 = \sum_{j=1}^{N_s} ((n_j - \bar{n})T_\Delta)^4 \frac{s_j^2}{\sum_{j=1}^{N_s} s_j^2}, \quad (1)$$

где μ_4 — оценка центрального момента четвертого порядка; σ_s — оценка выборочной дисперсии R-зубца, T_Δ — период дискретизации, n — порядковый номер отсчета кардиоцикла, j — порядковый номер отсчета R-зубца, N_R — объем выборки исследуемого фрагмента R-зубца.

2. Коэффициент формы i -го R-зубца F_i :

$$q_2 = F_i = \frac{\sigma_{s''}}{\sigma_s}, \quad (2)$$

где σ_s и $\sigma_{s''}$ — оценка выборочной дисперсии R-зубца и его второй производной соответственно.

3. Коэффициент корреляции смежных R-зубцов:

$$q_3 = \rho_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_s} (s_{ij} - m_i) \sum_{j=1}^{N_s} (s_{i-1,j} - m_{i-1})}{\sqrt{\sum_{j=1}^{N_s} (s_{ij} - m_i)^2 \sum_{j=1}^{N_s} (s_{i-1,j} - m_{i-1})^2}}, \quad m_i = \frac{1}{N_s} \sum_{j=1}^{N_s} s_{ij}, \quad (3)$$

$$m_{i-1} = \frac{1}{N_s} \sum_{j=1}^{N_s} s_{i-1,j}, \quad i = 1, 2, \dots, N_s,$$

где s_i — выборка отсчетов сигнала текущего R-зубца; s_{i-1} — выборка отсчетов сигнала предыдущего R-зубца.

Результаты анализа открытых верифицированных баз данных показывают, что целесообразно ввести пять дополнительных признаков:

4. Коэффициент сцепления ΔRR_i , отражающий отношение длительности текущего RR-интервала к длительности предыдущего:

$$q_4 = \Delta RR_i = \frac{RR_i}{RR_{i-1}}, \quad (4)$$

где RR_i — длительность RR-интервала, предшествующего текущему кардиоциклу; RR_{i-1} — длительность RR-интервала, предшествующего предыдущему кардиоциклу.

5. Коэффициент компенсаторной паузы ΔRR_{i+1} , отражающий отношение длительности последующего RR-интервала к длительности предыдущего:

$$q_5 = \Delta RR_{i+1} = \frac{RR_{i+1}}{RR_{i-1}}, \quad (5)$$

где RR_{i+1} — длительность следующего за текущим кардиоциклом RR-интервала.

6. Разность отклонения RR-интервалов на скользящем окне

$$q_6 = \Delta \sigma_i = \sigma_i - \sigma_{i-1}, \quad \Delta \sigma_i = \sqrt{\frac{1}{L-1} \sum_{j=1}^L (RR_j - \overline{RR})^2}, \quad \overline{RR} = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L RR_j, \quad (6)$$

где L — длина скользящего окна; σ_i — среднее квадратическое отклонение выборки из L RR-интервалов с включением текущего кардиоцикла; σ_{i-1} — среднее квадратическое отклонение выборки из L RR-интервалов, предшествующих текущему кардиоциклу.

7. Средняя величина i -го R-зубца R_i :

$$q_7 = \overline{R}_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_s} s_j}{N_R}. \quad (7)$$

8. Длительность i -го R-зубца T_{Ri} :

$$q_8 = T_{Ri} = N_R T_{\Delta}. \quad (8)$$

Отметим, что последние два параметра можно применять как по отдельности, так и в виде их произведения.

Полученное пространство информативных признаков обозначим как \mathbb{R}^8 . Результаты исследований показывают, что можно без существенных потерь привести имеющиеся информативные признаки к двум агрегированным показателям, полученным как взвешенная сумма соответствующих информативных признаков, нормированных относительно максимального

значения [11]. Первый показатель характеризует длительность RR-интервалов, второй — форму R-зубца:

$$W_{\text{len}} = \sum_{i=1}^3 \omega_i q_i, \omega_1 = 0,405, \omega_2 = 0,314, \omega_3 = 0,281, \sum_{i=1}^3 \omega_i = 1;$$

$$W_{\text{form}} = \sum_{i=4}^8 \omega_i q_i, \omega_4 = 0,096, \omega_5 = 0,074, \omega_6 = 0,389, \omega_7 = 0,249, \omega_8 = 0,192, \sum_{i=4}^8 \omega_i = 1.$$

Результаты исследования. Исследование проводилось на материалах отведения II открытой верифицированной базы данных MIT-BIH Arrhythmia DB и базе данных многоканальных ЭКГ Санкт-Петербургского Института кардиологической техники „ИНКАРТ“. Всего было обработано 182 101 кардиоциклов, принадлежащих трем классам: Ω_1 — нормальный кардиоцикл, Ω_2 — желудочковая экстрасистола, Ω_3 — предсердная экстрасистола. При классификации использован метод опорных векторов (SVM).

Результаты оценки показателей качества пространств информативных признаков приведены в таблице. В качестве показателя качества классификации выбрана сбалансированная F-мера.

Пространство информативных признаков	MIT-BIH Arrhythmia, %	ИНКАРТ, %
$\mathbb{R}^2 (W_{\text{len}}, W_{\text{form}})$	90,22	89,01
$\mathbb{R}^8 (q_1-q_8)$	92,10	91,95
$\mathbb{R}^3 (q_1-q_3)$	82,73	80,54

Результаты классификации демонстрируют обоснованность выбранного пространства информативных признаков для классификации различных состояний сердечного ритма.

Заключение. В работе рассмотрена актуальная задача формирования пространства информативных признаков по данным электрокардиограммы, на основании которых принимается решение о нарушениях сердечного ритма. К устоявшемуся набору из трех информативных признаков на основе анализа открытых верифицированных баз данных авторы предлагают ввести пять дополнительных признаков. Также показано, что можно привести имеющиеся информативные признаки к двум агрегированным показателям, полученным как взвешенная сумма соответствующих информативных признаков, нормированных относительно максимального значения.

Результаты классификации методом опорных векторов демонстрируют обоснованность выбранного пространства информативных признаков для классификации различных состояний сердечного ритма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Региональная программа Санкт-Петербурга „Борьба с сердечно-сосудистыми заболеваниями“ на 2019–2024 гг. [Электронный ресурс]: <<http://zdrav.spb.ru/ru/programms/heart/>>. (дата обращения 25.10.2024)
2. Жаринов О. О., Жаринов И. О. Применение корреляционно-экстремального метода для решения задач обнаружения и оценивания положений опорных точек QRS-комплексов в электрокардиограмме // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2011. Вып. 5. С. 85–90.
3. Zong W., Moody G. B., Jiang D. A robust open-source algorithm to detect onset and duration of QRS-complexes // Computers in Cardiology. 2003. N 30. P. 737–740.
4. Акоюн Б. К. Классификация эпизодов нарушений сердечного ритма по информативным признакам во временной области электрокардиограммы // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 4. С. 305–314. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-4-305-314.
5. Зарубин Ф. Е. Вариабельность сердечного ритма: стандарты измерения, физиологической интерпретации и клинического использования // Вестник аритмологии. 1998. № 10. С. 25–30. URL: <http://www.vestar.ru/atts/10480/HRV%20standards.pdf>.

6. Нестерова Е. А. Основы электрокардиографии. Нормальная электрокардиограмма // Кардиология: Новости. Мнения. Обучение. 2016. № 2. С. 77–85.
7. Рудницкий Л. В. Карманный справочник медицинских анализов. СПб: Питер, 2014. 320 с.
8. Иванов Г. Г., Дворников В. Е., Сбеитан С. и др. Анализ показателей структуры variability ритма сердца у здоровых лиц по данным PP- и RR-интервалов // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. Медицина. 2007. № 4. С. 26–34.
9. Анциперов В. Е., Забросаев И. В., Растягаев Д. В. Детектирование нарушений сердечного ритма с использованием техники аналитических спектров // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 12 [Электронный ресурс]: <<http://jre.cplire.ru/jre/dec15/4/text.html>>. (дата обращения 30.09.2024)
10. Friesen G. M., Jannett T. C., Jadallah M. A. et al. A comparison of the noise sensitivity of nine QRS-detection algorithms // IEEE Transactions on biomedical engineering. 1990. Vol. 37, N 1. P. 85-97.
11. Раскопина А. С., Боженко В. В., Татарникова Т. М. Использование глубокого обучения при диагностировании пневмонии по рентгеновским снимкам // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 4. С. 315–320. DOI:10.17586/0021-3454-2024-67-4-321-329.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Белла Кареновна Акопян

— Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной информатики; старший преподаватель; E-mail: akopyan.bella@yandex.ru

Татьяна Михайловна Татарникова

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Институт информационных технологий и программирования; директор; E-mail: tm-tatarn@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.07.24; одобрена после рецензирования 22.07.24; принята к публикации 22.10.24.

REFERENCES

1. <http://zdrav.spb.ru/ru/programms/heart/>. (in Russ.)
2. Zharinov O.O., Zharinov I.O. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, no. 5, pp. 85–90. (in Russ.)
3. Zong W., Moody G.B., Jiang D. *Computers in Cardiology*, 2003, no. 30, pp. 737–740.
4. Akopyan B.K. *Journal of Instrument Engineering*, 2024, no. 4(67), pp. 305–314, DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-4-305-314/. (in Russ.)
5. Zarubin F.E. *Arrhythmology Bulletin*, 1998, no. 10, pp. 25–30. (in Russ.)
6. Nesterova E.A. *Cardiology: News. Opinions. Training*, 2016, no. 2, pp. 77–85. (in Russ.)
7. Rudnitskiy L.V. *Karmannyu spravochnik meditsinskikh analizov* (Pocket Handbook of Medical Analyses), St. Petersburg, 2014, 320 p. (in Russ.)
8. Ivanov G.G., Dvornikov V.E., Sbeitan S., Bulgakova E.Ju., Alexandrova M.R., Gribanov A.N. *RUDN Journal of Medicine*, 2007, no. 4, pp. 26–34. (in Russ.)
9. Antsiperov V.E., Zabrosaev I.V., Rastyagaev D.V. *Journal of Radio Electronics*, 2015, no. 12, <http://jre.cplire.ru/jre/dec15/4/text.html>. (in Russ.)
10. Friesen G.M., Jannett T.C., Jadallah M.A. et al. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 1990, no. 1(37), pp. 85-97.
11. Raskopina A.S., Bozhenko V.V., Tatarnikova T.M. *Journal of Instrument Engineering*, 2024, no. 4(67), pp. 315–320, DOI:10.17586/0021-3454-2024-67-4-321-329. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

Bella K. Akopyan

— St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Informatics; Senior Lecturer; E-mail: akopyan.bella@yandex.ru

Tatiana M. Tatarnikova

— Dr. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Institute of Information Technologies and Programming; Director of the Institute; E-mail: tm-tatarn@yandex.ru

Received 15.07.24; approved after reviewing 22.07.24; accepted for publication 22.10.24.