

УДК 612.12: 004.93

Синтез фазовых портретов многоканальных ЭКГ как яркостных изображений в информационных базисах сингулярных векторов

А. М. Ахметшин, К. А. Ахметшин

Днепропетровский национальный университет, Украина

Резюме

Рассмотрены информационные возможности нового метода качественного анализа многоканальных электрокардиограмм в фазовом пространстве, образованном ортонормированными векторами сингулярного разложения, при этом фазовый портрет рассматривается в виде яркостного изображения. Яркость изображения пропорциональна числу пикселей имеющих одинаковые координаты в фазовом пространстве. Метод позволяет использовать математический аппарат теории цифровой обработки изображений и распознавания образов, что увеличивает информативность и достоверность анализа многоканальных ЭКГ.

Ключевые слова: многоканальная электрокардиограмма, фазовый портрет, сингулярное разложение, яркостное изображение, сегментация.

Клин. информат. и Телемед.
2013. Т.9. Вып.10. с.43–47

Вступление

Традиционный топологический анализ одноканальных ЭКГ базируется на синтезе фазовых портретов в системе координат $\{x(t) \div x(t)\}$ [1], или на использовании вариантов теоремы Такенса с синтезом двумерного фазового портрета в системе координат $\{x(t) \div x(t+m)\}$ [2], где m – параметр характеризующий глубину вложения временного ряда $x(t)$. Оставляя в стороне достоинства и недостатки обоих подходов отметим лишь, что фазовые портреты представляют собой интерполированные бинарные графики, что не позволяет установить общее количество динамических точек соответствующих одной и той же окрестности фазового пространства.

Помимо этого, при анализе многоканальных ЭКГ необходим синтез обобщенных фазовых портретов, отображающих все особенности анализируемого ансамбля как единого целого в полном яркостном диапазоне, а не только его бинаризованного аналога. В работе [3] для сжатия многоканальных ЭКГ и синтеза обобщенного фазового портрета было предложено использовать первые два сингулярных вектора сингулярного разложения анализируемого сигнального ансамбля. Однако и здесь был использован лишь бинаризованный обобщенный фазовый портрет.

Целью работы является демонстрация информационных возможностей нового метода синтеза обобщенных фазовых портретов многоканальных ЭКГ как полномасштабных яркостных изображений, что открывает возможность использования математических методов

цифровой обработки изображений [4] и теории распознавания образов [5] в целях повышения достоверности идентификации типа кардиологического заболевания.

Материалы, методы исследования, анализ результатов

1. Отображение и анализ многоканальных ЭКГ

Примеры многоканальных ЭКГ с установленными диагнозами были взяты из международной базы данных «Physionet».

На первом этапе проводится сингулярное разложение исходной сигнальной матрицы многоканальной ЭКГ $X(M \cdot N)$, где M – число отсчетов в отдельно взятом измерительном канале, N – общее число измерительных каналов

$$X = USV^T, \quad (1)$$

где S – диагональная матрица сингулярных чисел, характеризующая ранг матрицы X , причем $S_1 \geq S_2 \geq \dots \geq S_N$, причем $\sum_i S_i = 100\%$. Если, например,

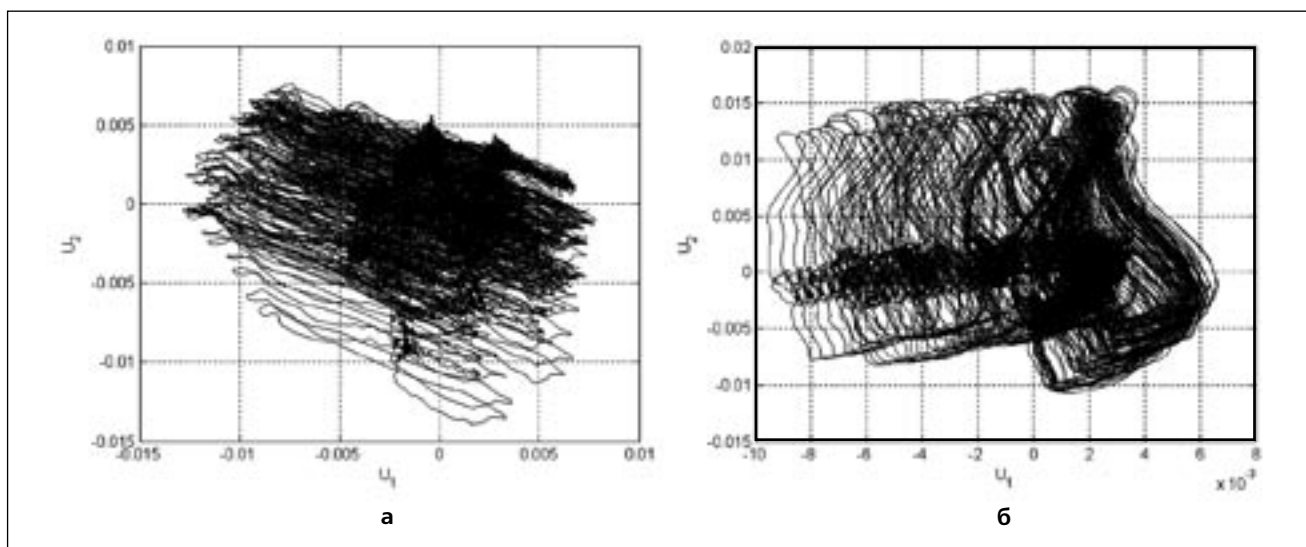


Рис. 1. Бинарные обобщенные фазовые портреты 15-ти канальной ЭКГ в системе координат $U_1(t)$ и $U_2(t)$: а — инфаркт; б — аритмия.

$(S_1 + S_2) \geq 95\%$, то в качестве нового информационного базиса следует выбирать сингулярные вектора U_1 и U_2 (следует отметить, что при проведении экспериментальных исследований ранг 15-ти канальной матрицы X никогда не превышал четырех).

Затем в системе координат $U_1(t)$ и $U_2(t)$ синтезируется обобщенный бинарный фазовый портрет (рис. 1).

Из рассмотрения рис.1 следует, что визуальный анализ не позволяет установить количество точек имеющих одинаковые координаты фазового пространства, что не позволяет осуществить процедуру кластерного анализа в целях выделения наиболее характерных признаков фазового портрета, пригодных для формализации процедуры компьютерного распознавания типа заболевания.

С помощью специально разработанной компьютерной программы был реализован алгоритм синтеза обобщенных фазовых портретов как яркостных изображений, где в качестве третьей координаты выступает число пикселей имеющих одинаковые координаты в фазовом пространстве, т. е. яркость синтезированного изображения пропорциональна их численности.

На рис. 2а, б представлены синтезированные яркостные фазовые портреты, соответствующие бинарным фазовым портретам на рис. 1. Сопоставление рис. 2а, б и рис. 1 показывает, что переход к яркостному восприятию позволяет визуально выделить области максимальной концентрации (т. е. максимально яркие области) и отбросить области соответствующие отдельным дискретным отсчетам, отчетливо прояв-

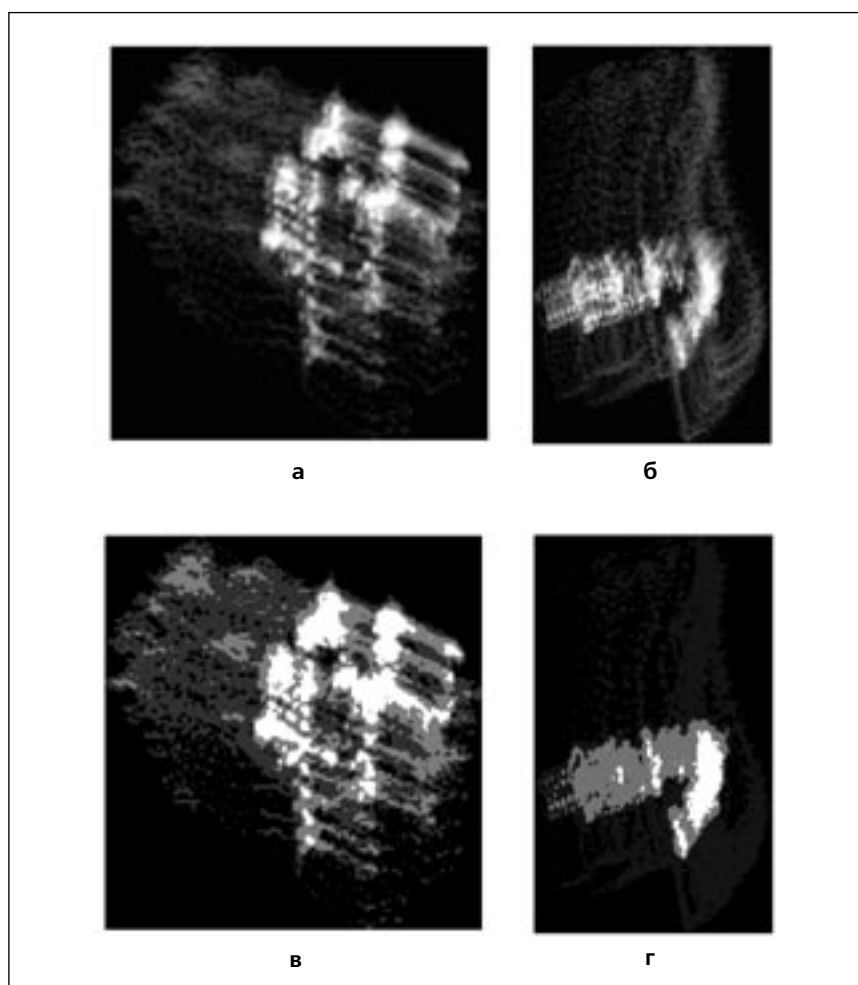


Рис. 2. Синтезированные яркостные фазовые портреты многоканальных ЭКГ соответствующих рис. 1: а — инфаркт; б — аритмия; в, г — сегментация яркостных портретов методом нечетких С-средних на четыре кластера.

ляющихся на рис. 2а, б поскольку, в отличие от фазовых портретов на рис. 1, здесь не используется интерполяция, а осуществляется прямой синтез яркостного портрета.

Эти области хорошо выделяются при использовании метода псевдоцветового кодирования, при адекватном выборе цветовой палитры.

По сравнению с бинарным фазовым портретом, предлагаемый подход основанный на использовании яркостных фазовых портретов, характеризуется следующими преимуществами:

- позволяет визуально идентифицировать область максимальной концентрации отсчетов ЭКГ в заданной области фазового пространства;
- открывается возможность использования псевдоцветового кодирования результирующего фазового портрета в целях облегчения и повышения достоверности результатов анализа;
- открывается возможность использования как математического аппарата цифровой обработки изображений, так и основных идей повышения качества и фильтрации результирующего изображения;
- вопрос фильтрации яркостных фазовых портретов имеет особое значение, поскольку из-за отсутствия интерполяции подобных изображений в них всегда присутствуют отдельные точки (фактически δ -функции), что предопределяет необходимость особой осторожности при фильтрации подобных изображений;
- такой подход позволяет использовать ряд интегральных преобразований, позволяющих выделять дополнительные информационные признаки в целях повышения надежности процедуры идентификации типа кардиологического заболевания;
- возможно использование методов сегментации изображения на основе

метода нечетких С-средних [6] или самоорганизующегося нейросетевого синтеза [7].

На рис. 2в, г представлены результаты нечеткой сегментации на четыре кластера по максимумам функции принадлежности исходных яркостных портретов на рис. 2а, а на рис. 3 представлены изображения функций принадлежности всех четырех кластеров, соответствующих первому яркостному изображению на рис. 2а.

Анализ рис. 3 и его сопоставление с рис. 2а показывает, что фазовый портрет функции принадлежности на рис. 3.2 может служить информационным признаком, возможно — эталоном, соответствующим данному типу кардиологического заболевания.

2. Интегральные преобразования яркостных фазовых портретов

К интегральным преобразованиям, широко используемым в теории цифровой обработки изображений и распознавании образов, относятся:

а) энергетический спектр двумерного преобразование Фурье

$$\begin{aligned} |I(\omega_x, \omega_y)|^2 &= \\ &= \left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) \exp\{-j(\omega_x x + \omega_y y)\} dx dy \right|^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где $I(x, y)$ — яркостный фазовый портрет; б) автокорреляционная функция (АКФ) изображения яркостного изображения фазового портрета

$$r(u, v) = \frac{\sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^N I(x, y) I(u+x, v+y)}{\sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^N I^2(x, y)} \cdot (3)$$

На рис. 4 представлены изображения энергетического спектра (а, в) и автокорреляционной функции (б, г) для диагнозов инфаркт (рис. 2а) и мерцательная аритмия (рис. 2б) соответственно.

Анализ рис. 4а, в свидетельствует о том, что энергетический спектр Фурье представляет собой широкополосную характеристику, что обусловлено наличием δ -образных точечных составляющих на рис. 2. Поэтому использование этой характеристики представляется нецелесообразным из-за сложности ее интерпретации, тогда как анализ автокорреляционной функции (рис. 4б, г) позволяет выявить характерные топологические особенности изображений фазовых портретов из-за нейтрализации влияния отдельных точек в исходных изображениях $I(x, y)$.

В качестве дополнительного варианта перехода к новому информационному базису возможно использование преобразования Радона исходного анализируемого изображения фазового портрета $I(x, y)$ [8], базирующееся на вычислении проекций изображения вдоль определенных направлений (углов). Проекция функции $I(x, y)$ на ось x' представляет собой линейный интеграл

$$\begin{aligned} R_\theta(x') &= \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} I(x' \cos \theta - y' \sin \theta, x' \sin \theta + y' \cos \theta) dy', \end{aligned} \quad (4)$$

где оси x' и y' задаются поворотом на угол θ против часовой стрелки

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (5)$$

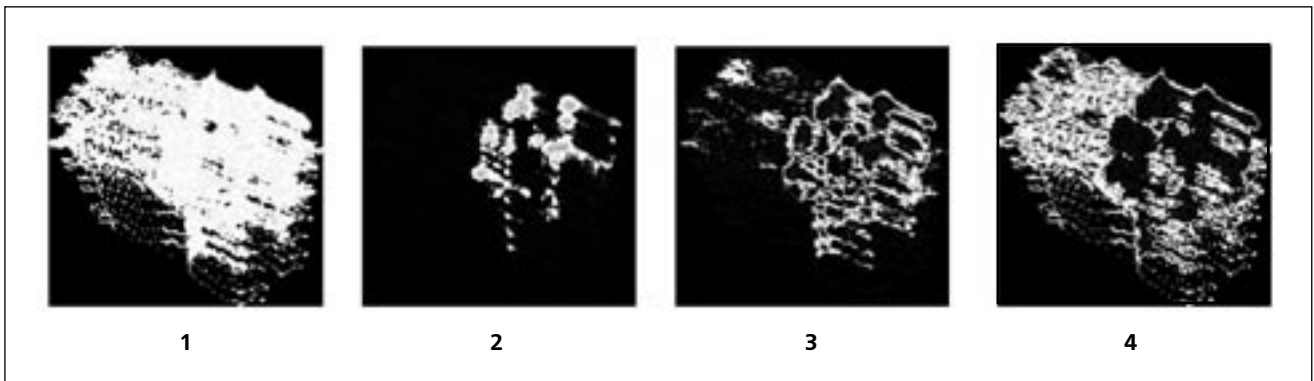


Рис. 3. Яркостные изображения четырех функций принадлежности, соответствующих рис. 2а, полученных в результате процедуры нечеткой сегментации.

Исходное полутоновое изображение рассматривается как двумерная функция. Таким образом, использование преобразования Радона обеспечивает переход к новому информационному базису, где ось «х» соответствует числу углов проецирования исходного изображения, а ось «у» — соответствует яркостным значениям проекций $R_{\theta}(x')$. С физической точки зрения, использование преобразования Радона позволяет «накопить» значения визуально неразличимых участков, в целях облегчения (упрощения) процедуры их последующей идентификации. В каком то смысле, эта операция близка к процедуре «усреднения», используемой в области цифровой обработки сигналов для выделения сигналов неизвестной формы на фоне аддитивных измерительных шумов в условиях, когда отношение сигнал/шум намного меньше единицы.

С практической точки зрения важен тот факт, что имеется как прямое, так и обратное преобразование Радона, что, с практической точки зрения, означает $I(x,y) \equiv R_{\theta}(x')$. Последнее обозначает, что можно анализировать либо $I(x,y)$, либо $R_{\theta}(x')$ и все определяется или силой привычки, либо общепринятыми традициями анализа.

На рис. 5 представлены яркостные изображения преобразования Радона от исходных изображений на рис. 2 соответственно. Как было отмечено выше, с математической точки зрения, информационные возможности рис. 2 и рис. 5 эквивалентны, однако при использовании преобразования Радона влияние большого числа отдельных точек на яркостных фазовых портретах (рис. 2) нейтрализуется, что, по нашему мнению, способствует повышению надежности интерпретации результатов с позиций теории распознавания образов. Для повышения достоверности анализа преобразованию Радона исходного изображения $I(x,y)$ можно использовать методы сегментации изображений рассмотренные выше. С чисто визуальной точки зрения, эффективным является использование псевдоцветовой кодировки синтезированных изображений, позволяющей надежно идентифицировать как визуально неразличимые области, так и зоны максимальной концентрации точек в фазовом пространстве.

Заключение

1. Синтез обобщенных фазовых портретов многоканальных ЭКГ как яркостных изображений в информаци-

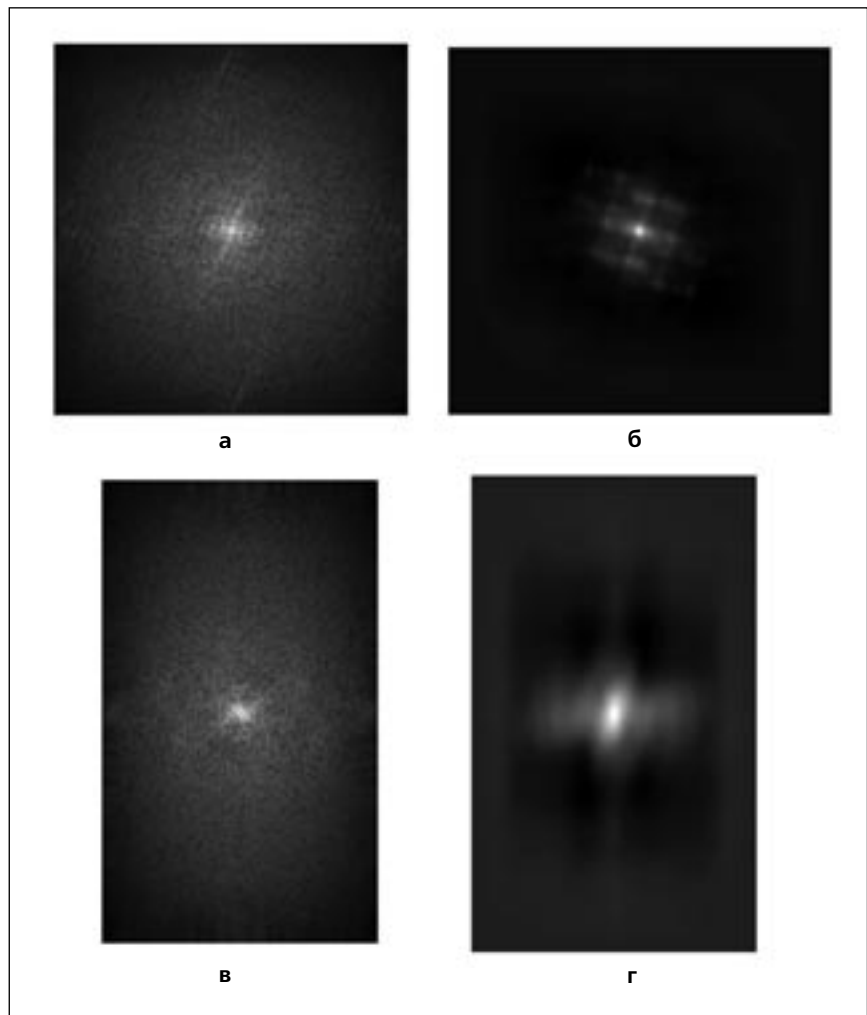


Рис. 4. Изображения энергетического Фурье-спектра (а, в) и автокорреляционной функции (б, г) для диагнозов инфаркт (рис. 2а) и мерцательная аритмия (рис. 2б) соответственно.

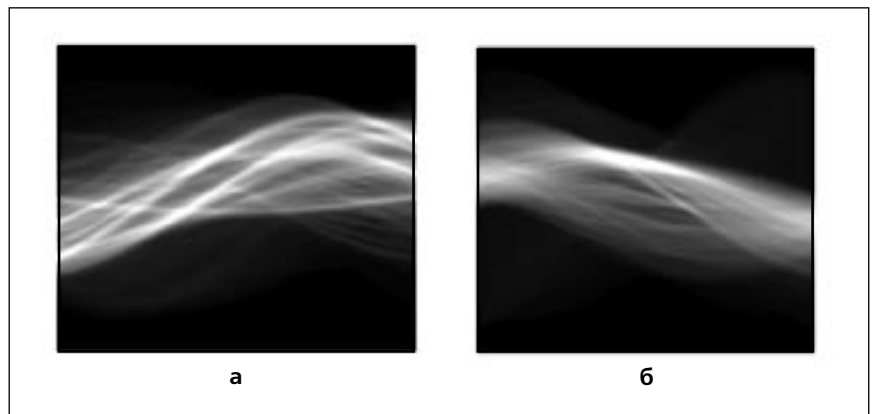


Рис. 5. Преобразование Радона от исходных изображений на рис. 2 соответственно.

онных базисах сингулярных векторов позволяет визуально идентифицировать область максимальной концентрации

отсчетов ЭКГ в заданной области фазового пространства и тем самым повысить общую информативность анализа.

2. Данный подход позволяет использовать весь математический аппарат теории цифровой обработки изображений в целях повышения достоверности идентификации типа кардиологического заболевания.

3. Использование методов сегментации результирующего яркостного фазового портрета анализируемой ЭКГ позволяет выделить наиболее информативные участки, что открывает принципиальную возможность синтеза эталонных фазовых портретов с последующим использованием математического аппарата теории распознавания образов и искусственного интеллекта для облегчения процедуры диагностики заболевания.

Литература

1. Файнзильберг Л. С. Информационные технологии обработки сигналов сложной формы: теория и практика / Л. С. Файнзильберг // – Киев, Наукова думка, 2008. – 333 с.
2. Perc M. Nonlinear time series analysis of the human electrocardiogram / M. Perc // European Journal of Physics. – 2005. – Vol.26. – P.757–768.
3. Ахметшин А. М. Отображение и анализ многомерных медицинских данных в ортогональных информационных базисах / А. М. Ахметшин, К. А. Ахметшин // Клиническая информатика и телемедицина, 2012, Т.8, Вып.9., с.30–34.
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс // – М.: Техносфера, 2006. – 1070 с.
5. Theodoridis S. Pattern recognition / S. Theodoridis, K. Koutroumbas // – San Diego, Academic Press, 2003. – 682 p.
6. Chi Z., Yan H., Pham T. Fuzzy algorithms: With Applications to Image Processing and Pattern Recognition / Z. Chi, H. Yan, T. Pham // – Singapore; – New Jersey; – London; – Hong Kong: «Word Scientific», – 1998. – 225 p.
7. Кохонен Т. Самоорганизующиеся карты / Т. Кохонен // – Москва, БИНОМ, 2008. – 655 с.
8. Хелгасон С. Преобразование Радона / С. Хелгасон // – Москва, Мир, 1983. – 150 с.

Phase portrait synthesis of multichannel ECG as brightness images at information bases of singular vectors

A. M. Akhmetshyn, K. A. Akhmetshyn
Dnepropetrovsk National University
Ukraine

Abstract

Information possibilities a new method multidimensional electrocardiogram quality analysis in a phase space made by orthonormalized singular vectors are considered. The phase portrait is considered as the brightness image. The image brightness is proportional by number pixels with identical coordinate in a phase spaces. The method give facility for using mathematical apparatus of digital image processing and pattern recognition theories for increasing informativity and validity of multidimensional electrocardiogram analysis.

Key words: multichannel electrocardiogram, phase portrait, singular decomposition, brightness image, segmentation.

Синтез фазових портретів багатоканальних ЕКГ як яскравістних зображень в інформаційних базисах сингулярних векторів

О. М. Ахметшин, К. О. Ахметшин
Дніпропетрівський національний університет, Україна

Резюме

Розглянуті інформаційні можливості нового методу якісного аналізу багатовимірних електрокардіограм у багатовимірному фазовому просторі утворюваним ортонормованими векторами сингулярного розкладу. Фазовий портрет розглядається у виді яскравого зображення. Яскравість зображення пропорційна числу пікселів які мають однакові координати у фазовому просторі. Метод відкриває можливість використання математичного апарату теорії цифрової обробки зображень та розпізнавання образів, що збільшує інформативність та вірогідність аналізу багатоканальних електрокардіограм.

Ключові слова: багатоканальна електрокардіограма, фазовий портрет, сингулярний розклад, яскраве зображення, сегментація.

Переписка

д. ф.-м. н. профессор **А. М. Ахметшин**
Днепропетровский национальный университет
пр. Гагарина, 72
Днепропетровск, 49000, Украина
эл. почта: akhmlu@mail.ru