

Опубликовано в Трудах Международной научной конференции "Развитие информационно-коммуникационных технологий и построение информационного общества в Украине" (Ганновер, Германия, CeBIT-2007). – Киев, ДВІА "Зв'язок", 2007. – С. 114-123.

УДК 621.317.755

Л.С. Файнзильберг, О.А. Жуковская

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ФАЗОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ

INTELLECTUAL COMPUTER MEANS FOR BIOLOGICAL SIGNALS PROCESSING IN THE PHASE SPACE

1. Введение.

Компьютерный анализ и интерпретация сигналов, порождаемых биологическими системами в процессе своего функционирования, получают все большее применение для неинвазивной (косвенной) диагностики состояния внутренних органов, в биометрических системах защиты информации и других областях применения. Существует достаточно широкий класс биологических объектов, состояния которых оценивают по признакам, сосредоточенным на локальных участках области определения наблюдаемого сигнала. Так, например, неинвазивная диагностика состояния сердечно-сосудистой системы живого организма проводится по амплитудно-временным параметрам локальных фрагментов электрокардиограмм (ЭКГ), реограмм, сфигмограмм и других биологических сигналов.

В то же время классические методы, в частности методы разложения в функциональные ряды, мало пригодны для обработки сигналов с локально сосредоточенными признаками, поскольку коэффициенты функционального ряда мало чувствительны к изменениям сигнала на информативных фрагментах сигнала. Поэтому внимание специалистов привлекают альтернативные подходы к компьютерному анализу таких сигналов.

В статье на примере решения задачи компьютерной обработки ЭКГ описываются результаты исследований нового подхода к построению интеллектуальных компьютерных средств, обеспечивающих реализацию эффективного метода анализа и интерпретации биологического сигнала с локально-сосредоточенными признаками в фазовом пространстве координат [1-4].

2. Метод обработки ЭКГ в фазовом пространстве.

В реальных условиях наблюдения биологический сигнал подвержен влиянию внутренних и внешних возмущений, которые искажают форму информативных фрагментов и тем самым вызывает проблемы при построении компьютерных систем анализа и интерпретации ЭКГ во временной области. Даже решение, казалось бы, совсем простой задачи разделения ЭКГ на отдельные сердечные циклы ($R - R$ интервалы) требует применения достаточно сложных компьютерных алгоритмов обнаружения QRS -комплексов [5,6].

Еще более серьезные проблемы вызывает компьютерный анализ диагностических признаков, сосредоточенных на локальных фрагментах сигнала. Дело в том, что при изменении частоты сердечных сокращений (ЧСС) происходит *нелинейная* деформация продолжительности отдельных циклов, что вызывает известные проблемы при использовании традиционных алгоритмов усреднения ЭКГ во временной области: при усреднении информативные фрагменты «размываются» и, как следствие, возникают ошибки в интерпретации сигнала.

В основу предложенного альтернативного подхода к обработке биологического сигнала в фазовом пространстве координат положена генеративная модель порождения сиг-

нала с локально-сосредоточенными признаками в условиях внутренних и внешних возмущений, которая является стохастическим обобщением периодических и почти периодических функций [3]. Формально эта модель имеет вид

$$y_m^{(i)}(t) = (1 + \xi_m) y_0^{(i)}(\theta), \quad (1)$$

где

$$\theta = \frac{t - (m-1)T_0 + t_0^{(i-1)}(1 + \delta_m^{(i)}) - \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{i=1}^{K_x} (t_0^{(i)} - t_0^{(i-1)}) \delta_j^{(i)} - \sum_{l=1}^{i-1} (t_0^{(i)} - t_0^{(i-1)})(1 + \delta_m^{(l)})}{1 + \delta_m^{(i)}}, \quad (2)$$

– *нелинейная* величина, имеющая размерность времени, а ξ_m , $\delta_m^{(i)}$ – последовательность ограниченных по уровню случайных величин с нулевым математическим ожиданием.

Численное моделирование подтвердило адекватность предложенных моделей для описания реальных ЭКГ (рис.1).



Рис.1. Искусственные электрокардиограммы, порожденные моделью (1), (2) по одному (а) и двум (б) эталонам

Исследования предложенной модели порождения ЭКГ показали, что для любой фиксированной точки $\theta = \theta_x$ области определения эталона $y_0(\cdot)$ фазовые координаты соответствующих точек искаженных циклов будут группироваться в *локальной* области фазового пространства с центром в точке с координатами $y_0(\theta_x), \dot{y}_0(\theta_x)$ и радиусом $\rho_x = \rho(\theta_x)$, удовлетворяющим соотношению

$$\rho^2(\theta_x) = y_0^2(\theta_x) \xi_m^2 + \dot{y}_0^2(\theta_x) \left[\frac{\delta_m^{(i)} - \xi_m}{1 + \delta_m^{(i)}} \right]^2,$$

причем математическое ожидание отклонений $y(\theta_x), \dot{y}(\theta_x)$ от истинных значений $y_0(\theta_x), \dot{y}_0(\theta_x)$ равно нулю.

Этот факт дал ключ к построению эффективного компьютерного алгоритма оценки эталонного цикла наблюдаемой ЭКГ: достаточно усреднить точки в локальных областях фазового пространства и в результате получить представление об эталонном цикле в фазовом пространстве и во временной области (рис. 2).

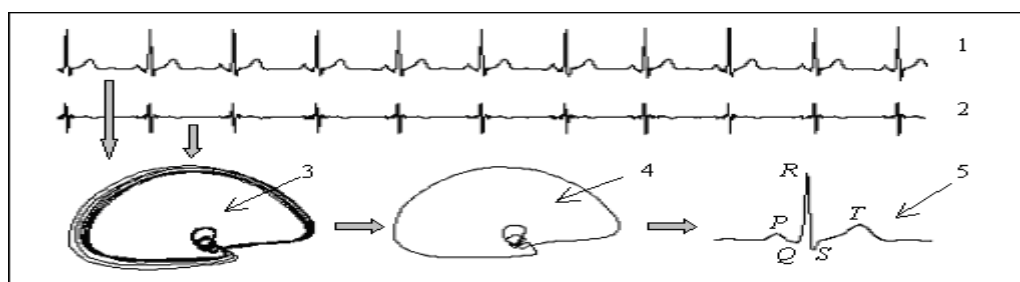


Рис.2. Иллюстрации предложенного метода обработки сигнала наблюдаемый сигнал (1), оценка его первой производной (2), фазовая траектория сигнала (3), усредненная фазовая траектория (4), оценка эталонного цикла во временной области (5)

3. Практическое применение метода для диагностики функционального состояния сердечно-сосудистой системы человека.

На основании многочисленных наблюдений обнаружен ряд интересных свойств фазовых траекторий ЭКГ. В частности, обнаружено, что под действием нагрузок у слабо тренированных лиц увеличивается параметр β_T , характеризующий соотношение скоростей на восходящем и нисходящем участках фрагмента реполяризации усредненной фазовой траектории, в то время как у «спортивных» людей такие изменения чаще всего не существенны [8]. Наблюдения также показали, что значение параметра β_T практически не зависит от номера отведения ЭКГ. Эти факты были положены в основу информационной технологии **ФАЗАГРАФ**.

Информационная технология **ФАЗАГРАФ** предназначена для оперативной оценки функционального состояния сердечно-сосудистой системы человека и выявления начальных признаков изменений в работе сердца под действием физических и эмоциональных нагрузок. Представляет собой портативный микропроцессорный сенсор, обеспечивающий регистрацию электрокардиосигнала с пальцев рук испытуемого, и компьютерную программу, которая реализует предложенный метод обработки сигнала в фазовом пространстве.

В отличие от традиционных, предложенный метод позволяет «увидеть» в электрокардиограмме признаки даже незначительных патологических изменений в сердце, которые при традиционной обработке электрокардиограмм остаются незамеченными.

Информационная технология **ФАЗАГРАФ** реализован в двух модификациях: *упрощенный вариант* для бытового применения и *полноценный вариант* для массовых амбулаторных обследований в поликлиниках, диагностических центрах, медслужбах предприятий, санаториях и т.п. (рис. 3).



Рис.3. Информационная технология **ФАЗАГРАФ**

Упрощенный вариант для домашнего применения не требует специального медицинского образования: результаты диагностики отображаются на индикаторе в виде «градусника» с тремя градациями текущего состояния обследуемого – “**НОРМА**” (зеленый цвет), “**ВНИМАНИЕ**” (желтый цвет), “**ТРЕВОГА**” (красный цвет), а также сопровождаются голосовым сообщением.

Полноценный вариант для массовых амбулаторных обследований содержит широкий набор средств, обеспечивающих мониторинг за состоянием сердечно-сосудистой системы большой группы обследуемых с комплексным анализом по набору диагностических критериев. Программа осуществляет топологическую визуализацию показателей сердечной деятельности и оценку функционирования вегетативной нервной системы. Для сигнализации отклонений рассчитанных показателей от нормы используется цветовая схе-

ма, где жёлтый цвет означает незначительное отклонение показателя от нормы, а красный – существенный выход за границы нормы.

Основные преимущества технологии **ФАЗАГРАФ** по сравнению с существующими:

- простота использования для самоконтроля в бытовых условиях и при занятиях спортом.
- удобство при выполнении массовых профилактических обследований (сокращенное время исследования – до 30 секунд, не требует расходных материалов);
- возможность использования непосредственно на рабочем месте для контроля операторов, работающих в условиях повышенного риска (водители транспортных средств, авиадиспетчеры и т.п.);

Для оценки диагностической эффективности предложенной информационной технологии анализа и интерпретации ЭКГ в фазовом пространстве координат использовались данные, полученные в отделения ишемических болезней сердца НИИ кардиологии им. В.Д. Стражеско АМН Украины (Киев), а также четырех клиник Германии – Essen University Hospital (Essen), Katholical Hospital "Phillpusstift" (Essen), Heart and Diabetes Center of North Rhein-Weasfalia (Bad-Oeynhausen), German Heart Center (Berlin).

Клинический материал составлял 441 запись ЭКГ верифицированных больных ишемической болезнью сердца (ИБС) и 387 записей ЭКГ здоровых добровольцев, включенных в контрольную группу. Важно отметить, что в группу больных были включены пациенты, которые предварительно прошли коронарографию, подтвердившую диагноз ИБС, однако ЭКГ этих пациентов не имели характерных смещений участка $S-T$ относительно изоэлектрической линии. Другими словами, традиционный анализ ЭКГ таких пациентов давал бы ложноотрицательные результаты.

Тем не менее, статистическая обработка данных показала, что среднее значение предложенного нового признака β_T существенно различалось в группе ИБС и контрольной группе и составило $0,956 \pm 0,43$ и $0,665 \pm 0,12$ соответственно. Проверка полученного результата по t -критерию Стьюдента подтвердила, что с высокой вероятностью ($P > 0,999$) гипотеза о случайном различии средних может быть отброшена.

Для оценки эффективности диагностического правила, положенного в основу информационной технологии **ФАЗАГРАФ**, использовались разработанные нами методика, основанные на привлечении аппарата теории статистических решений и методов интервального анализа [9]. Эти методика позволила по выборкам ограниченного объема с заданной доверительной вероятностью подтвердить эффективность диагностического теста для проведения массовых профилактических обследований населения. Установлено, что предложенная технология обеспечивает чувствительность $S_E = 81\%$, специфичность $S_p = 78\%$, прогностичность положительного результата $P(+)= 80,8\%$, отрицательного результата $P(-) = 78,2\%$ и остается эффективной в достаточно широком интервале соотношения потерь от ложно положительных и ложно отрицательных результатов диагностики.

Дальнейшим развитием информационной технологии **ФАЗАГРАФ** является создание интеллектуального микропроцессорного устройства **ПКАР-2006** (рис. 4).



Рис.4. Внешний вид микропроцессорного устройства **ПКАР-2006**

Микропроцессорное устройство **ИКАР-2006** имеет автономный источник питания и внутренний экран. Устройство обеспечивает:

- регистрацию ЭКГ 1 стандартного отведения непосредственно с пальцев рук испытуемого;
- автоматическое вычисления комплекса традиционных признаков ЭКГ (ЧСС, продолжительностей интервалов $P-Q$, комплекса QRS , смещение сегмента ST относительно изоэлектрической линии др., а также сигнализацию отклонения этих признаков от нормы;
- автоматическое вычисления оригинального признака β_T и индикацию возможных отклонений значений этого признака от нормы, свидетельствующих о функциональных и органических нарушениях сердечной мышцы;
- автоматическое измерение и сохранение на сменной флеш-карточке объемом 256 Мб электрокардиограмм грудных отведений в соответствии с заданными пользователем параметрами внутреннего таймера (интервал измерения, интервал паузы между измерениями число измерений);
- автономное управление режимами работы устройства и его настройку с помощью внутренней системы меню;
- реализация двухстороннего обмена данными с персональным компьютером, в частности, передачу в реальном времени пакетов цифровых данных с помощью радиоканала ZigBee (2,4 ГГц, 1 мВт).

В настоящее время ведется также разработка нового интеллектуального микропроцессорного регистратора ЭКГ **ТЕЛЕКАРДИАН**, которое обеспечивает передачу цифровых данных практически на любые расстояния с помощью каналов мобильной телефонной связи в системе GSM и GPRS.

4. Индивидуальные особенностей фазового портрета ЭКГ – перспектива создания новых биометрических систем ограничения доступа.

На современном этапе развития информационного общества все большее значение приобретают методы защиты от несанкционированного доступа к информации и различным техническим средствам. Однако существующие системы аутентификации пользователя, основанные на проверке пароля, индивидуального ключа либо иного идентифицирующего документа, обладают существенным недостатком: пароль можно забыть, потерять или подделать.

Поэтому всё больший интерес вызывают компьютерные биометрические системы аутентификации, основанные на уникальных биологических характеристиках человека. Наибольшее распространение получили дактилоскопические системы (Automatic Finger Detect Systems), основанные на автоматическом распознавании отпечатков пальцев [10, 11]. Получили известность также методы защиты от несанкционированного доступа, основанные на автоматическом распознавании изображения лица и индивидуальных свойствах речевого сигнала.

В работе [12] была впервые сформулирована гипотеза об индивидуальных особенностях фазового портрета электрокардиограммы (ЭКГ). Проведенные к настоящему времени многочисленные эксперименты подтвердили эту гипотезу и позволили создать первые образцы интеллектуальных компьютерных средств, основанных на этом методе.

Как видно из рисунка 5, различие двумерных фазовых портретов ЭКГ более выразительно, чем различие одномерных ЭКГ во временной области, породивших эти портреты.

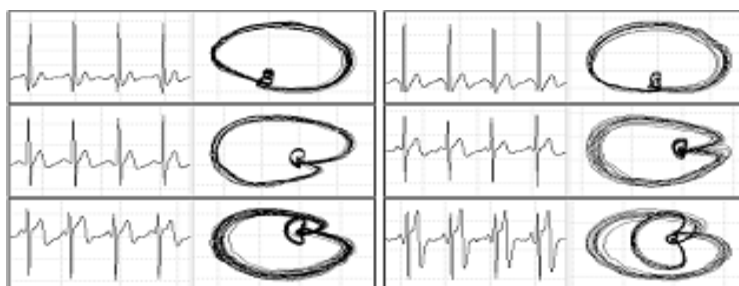


Рис 5. Примеры реальных ЭКГ во временной области и в фазовом пространстве

Эксперименты также показали, что отличительные особенности фазового портрета ЭКГ конкретного испытуемого сохраняются на протяжении достаточно большого интервала времени (рис. 6).

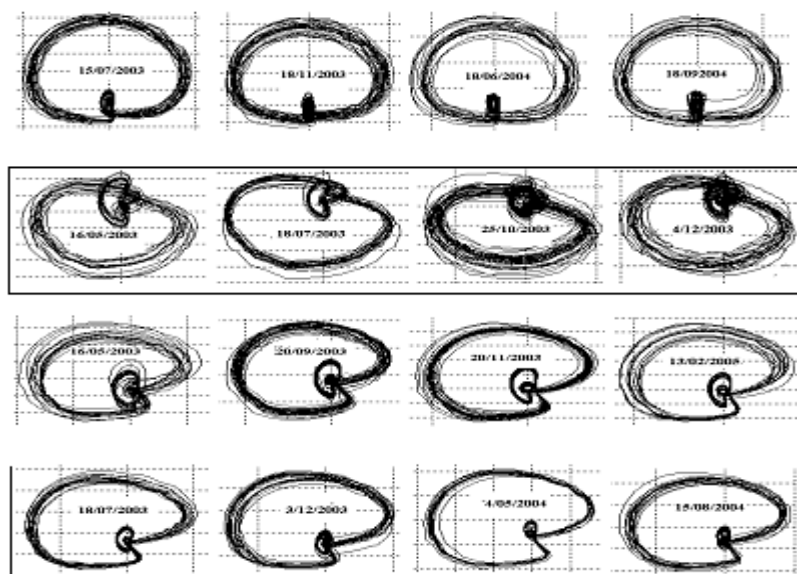


Рис. 6. Галерея фазовых портретов ЭКГ четырех испытуемых

Для экспериментальной проверки эффективности метода при решении задач идентификации (указания номера пользователя в фиксированном списке) и верификации (подтверждения логина, указанного пользователем) на основе компьютерной обработки ЭКГ в фазовом пространстве разработан комплекс интеллектуальных программных средств, реализованных в информационной технологии **БИКОС**. Первые эксперименты подтвердили перспективность предложенного метода – достоверность решения на выборке более 100 человек составила 95.8 %.

4. Заключение.

Предложенный метод обработки биологического сигнала с локально сосредоточенными признаками на примере обработки ЭКГ подтвердил свою эффективность для оперативной оценки функционального состояния сердечно-сосудистой системы человека, а также задач идентификации и верификации пользователя на основе индивидуальных особенностей его ЭКГ. Это дает перспективу создания серии интеллектуальных компьютерных средств для при решении актуальных прикладных задач современного общества.

Список литературы

1. Пат. № 24517 (Украина) МКИ А61 В 5/024. Способ интегральной оценки текущего состояния сердечно-сосудистой системы человека // Л.С.Файнзильберг (Украина). № 97052323; – Заявлено 21.05.97; Оpubл. 30.10.98, Бюл.1998, № 5.– 4 с.
2. *Fainzilberg L.S.* Heart Functional State Diagnostic Using Pattern Recognition of Phase Space ECG-Images. – Proc. of the 6th European Congress on intelligent techniques and soft computing (EUFIT '98). – Aachen (Germany). - 1998. – No: B- 27. – Vol. 3. – P. 1878-1882.
3. *Fainzilberg L.S.* ECG Averaging Based on Hausdorff Metric // International Journal of Biomagnetism.– 2003.–Vol. 5.– № 1.–P.236-237.
4. *Файнзильберг Л.С.* Компьютерный анализ и интерпретация электрокардиограмм в фазовом пространстве // Системные исследования и информационные технологии.– 2004.–№ 1.– С.34-46.
5. *Furno G., Tompkins W.* QRS detection using automata theory in battery powered microprocessor system // Proc. IEEE Frontiers Eng. Health Care. – 1982. – Vol. 9. – P. 155.
6. *Pan J., Tompkins W.* A Real-Time QRS Detection Algorithm // IEEE Transaction on Biomed. Engr.-- 1985. – Vol. 32.– No. 3.– P. 230 - 236.
7. *Файнзильберг Л.С.* Восстановление эталона циклических сигналов на основе использования хаусдорфовой метрики в фазовом пространстве // Кибернетика и системный анализ. – 2003. – № 3. – С. 20-28.
8. *Fainzilberg L.S.* Nowa metoda interpretacji zapisu EKG w balaniach skriningowych oraz w opiece domowej // «Zdrowie publiczne».– 2005.– Vol. 115.– Number 4.– P.458-464.
9. *Жуковская О.А. , Файнзильберг Л.С.* Формальная оценка квалификации эксперта на основе байесовской модели и методов интервального анализа // Проблемы управления и информатики.– 2005. – № 3.– С.103-115.
10. *Jain A., Hong L., Bolle R.* On-Line Fingerprint Verification // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence.– 1997.– Vol. 19.– No. 4.– P. 302-314.
11. *Hong L., Wan Y., Jain A.* Fingerprint Image Enhancement: Algorithm and Performance Evaluation // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence.– 1998.– Vol. 20.– No. 8.– P.777-789.
12. *Fainzilberg L.S., Potapova T.P.* Computer Analysis and Recognition of Cognitive Phase Space Electro-Cardio Graphic Image // Proc. of the 6th Int. Conf. on computer analysis of images and patterns (CAIP'95). – Prague (Czech. Republic). – 1995. – P. 668 - 673.