

Предложенный алгоритм был апробирован в Институте вычислительного моделирования при создании системы учёта результатов научной деятельности и веб-системы сбора данных, являющейся частью системы консолидации и анализа данных центров мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций.

Литература

1. Коробко А.А., Ничепорчук В.В., Ноженков А.И. Динамическое формирование интерфейса ВЕБ-системы сбора данных мониторинга чрезвычайных ситуаций // Информатизация и связь. 2014. № 3. С. 59-64.
2. Object Management Group Model Driven Architecture (MDA), MDA Guide rev. 2.0, OMG Document ormsc/2014-06-01, <http://www.omg.org/cgi-bin/doc?ormsc/14-06-01>.
3. OMG Meta Object Facility (MOF) Core Specification, ver. 2.5, OMG Document formal/2015-06-05, <http://www.omg.org/spec/MOF/2.5/>.
4. Коробко А.А. Модельно-ориентированная система сбора данных // Проблемы информатизации региона. ПИР 2015: Материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции – Красноярск. 2015. С. 116-123.
5. Seidewitz E. What Models Mean, IEEE Software, 2003, vol. 20, no. 5, pp.26-32.
6. Atkinson C., Kühne T. Model-Driven Development: A Metamodeling Foundation (Spec. issue on Model-Driven Development) // IEEE Software. 2003. Vol. 20. No. 5. P.36-41.
7. Korobko Aleksei A., Korobko Anna V. Constructing Domain model for Scientific Activity Management System // Modeling of Artificial Intelligence. 2015. Vol. (6). Is. 2. pp. 82-89.

Algorithm of program components generation for the model-driven system

Aleksei Aleksandrovich Korobko, scientific researcher,

Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the RAS (ICM SB RAS),

Author's approach to the construction of model-driven system is described. Set-theoretic description of meta-metamodel for Scientific Activity Management System is presented. A set of algorithms for program components generation is suggested.

Keywords: scientific activity results, web-system, ad-hoc data consolidation, model driven architecture, dynamic generating user interface, relational data model.

УДК 004.891.3

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА

Кристина Андреевна Красовицкая, магистрант

Тел.: +7 983 463 1106, e-mail: kristina.kras1993@gmail.com,

*Иркутский национальный исследовательский технический университет
www.istu.edu/*

Евгений Александрович Черкашин, старший научный сотрудник, к. т.н., доцент

Тел.: +79148706754, e-mail: eugeneai@irpno.net

*Иркутский национальный исследовательский технический университет
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова
Сибирского отделения Российской академии наук
www.istu.edu/, <http://www.icc.irk.ru/>*

В данной работе представлен этап разработки кардиологической экспертной системы. Рассмотрены задачи выделения вектора данных из линии напряжения на ЭКГ, нахождения пиков PQRST, анализа ЭКГ посредством вейвлет-преобразования.

Ключевые слова: ЭКГ, анализ, биомедицинский сигнал, машинное обучение

Введение

Современный уровень развития информационных технологий позволяет повысить уровень эффективности анализа медицинских изображений, в частности электрокардиограмм, автоматизировать рутинные процессы обработки данных статического и многоэтапного анализа. Имеющееся на сегодняшний день программное обеспечение электрокардиографов рассчитано на опытных функциональных диагностов и жестко привязано к определённой модели аппарата, что ограничивает возможность сравнительного анализа электрокардиограмм одного пациента, выполненных в разных регионах или разных медицинских центрах одного города. Это вызывает необходимость дополнительных движений дообследования, что существенно повышает стоимость пребывания пациента в диагностическом центре. На сегодняшний день во многих районах России ещё остается хронически незавершенным вопрос полноценной штатной комплектации высококвалифицированными специалистами-кардиологами. По этой причине ургентная и специализированная помощь внезапно заболевшему проводится с



К.А. Красовицкая



Е.А. Черкашин

нежелательной временной задержкой, что нередко приводит к фатальным осложнениям. С целью повышения качества и доступности медицинского кардиологического обеспечения для населения Министерство здравоохранения в конце февраля 2016 г. приступило к разработке проекта закона, направленного на создание правовых основ использования информационно-телекоммуникационных технологий в сфере охраны здоровья граждан, в котором предусматривается стимулирование использования информационно-телекоммуникационных технологий с целью организации дистанционного взаимодействия медицинских работников, а также медицинского работника и па-

циента. Специалисты и пациенты, освоившие Интернет, пользуются удаленной консультацией специалистов, высылая им фотографии или отсканированные изображения, однако многие онлайн-услуги являются частью рекламной кампании частных клиник, поэтому их заключения вполне логично ставятся под сомнения. Одним из преимуществ автоматизированной компьютерной диагностики является снижение влияния человеческого фактора на итоговое заключение, т.к. на работоспособность врача влияет степень утомления, время наблюдения, собственное физическое состояние. Кроме того, анализ, выполняемый человеком, носит, как правило, качественный характер. Например, величина интервала PQ представляется короче общепринятой нормы, описанной в книгах. Следовательно, субъективная оценка варьируется от одного исследователя к другому по разным причинам.² Компьютерная обработка ЭКГ обеспечивает возможность количественного анализа.

Уже более пятнадцати лет в сфере компьютерной обработки электрокардиосигнала проводятся исследования, но, как правило, каждый из методов обладает рядом недостатков, которые не позволяют осуществить его полноценное внедрение. Система «Валента» анализирует сигналы ЭКГ, однако ввести в неё данные с оборудования другой фирмы или же снятые другими аппаратами оцифрованные ленты возможности нет. Системы мониторингового контроля, например, система контроля аритмий Argus, так же требуют наличия специального оборудования. Профессором д.м.н. В.М.Успенским предложен новый метод диагностики, позволяющий диагностировать широкий спектр забо-

² Р.М.Рангайян «Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход». М.: Физмалит. 2010. – 440 с. – ISBN 978-5-9221-0730-3.

леваний внутренних органов по ЭКГ.³ Но и в этом случае алгоритм не охватывает существенную часть заболеваний сердца, основным проявлением которых являются аритмии. Только за последние три года процент страдающих аритмиями составил 8%⁴. Ни одна из рассмотренных систем не обрабатывает бумажные электрокардиограммы, хотя сегодня этот вид носителя электрокардиоинформации остается самым популярным. Оцифровка лент ЭКГ так же позволяет сохранить важные диагностические данные в истории болезни и архиве пациента.

В данном исследовании решено разработать систему, которая будет обрабатывать изображения электрокардиограмм и предназначена для применения как в кабинетах кардиолога, так и в амбулаторных условиях.

Электрокардиограмма (ЭКГ) – это графическое отображение (регистрация) прохождения электрического импульса по узлам и пучкам проводящей системы сердца. Прохождение импульса по проводящей системе сердца графически записывается по вертикали в виде пиков – подъемов и спадов кривой линии. Эти пики принято называть зубцами электрокардиограммы и обозначать латинскими буквами P, Q, R, S и T. Анализ любой ЭКГ следует начать с проверки правильности техники ее регистрации⁵.

Регистрация разности потенциалов электрического поля сердца с двух точек поверхности тела называется отведением. Стандартную ЭКГ записывается в 12-ти отведениях: трёх — 2-х полюсных (3 стандартных отведения), трёх 1-полюсных усиленных отведений от конечностей, шести 1-полюсных грудных отведений⁶ (рис. 1).

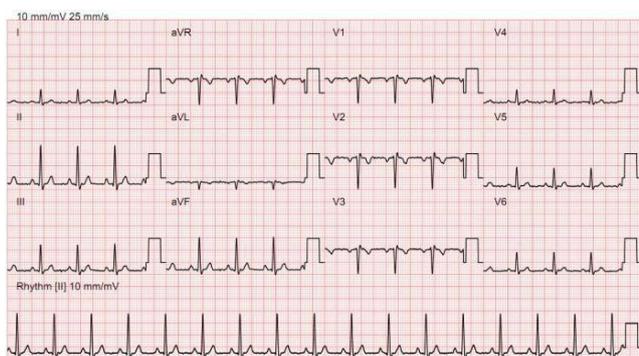


Рис. 6. Стандартная лента записи ЭКГ

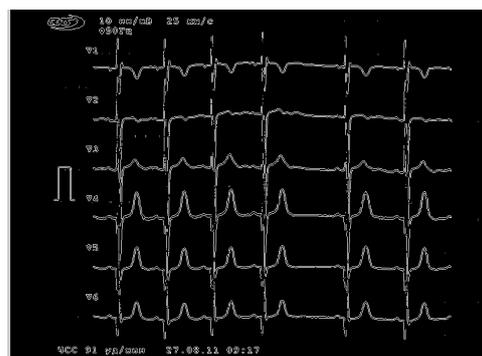


Рис. 7. Результат работы фильтра Соболя. Неворуженным глазом видны артефакты - двойная линия, прерывистый контур, шум

Изображение ЭКГ относится к медицинским изображениям, входящим в комплекс утверждённого министерством здравоохранения протокола обследования и лечения больного, согласно нозологической форме предварительного и окончательного диагноза. Для обработки медицинских изображений разработано множество методов. Казалось бы, разумно к электрокардиограмме применить какой-либо метод выделения края. Мы провели серию экспериментов, однако ни один из разработанных фильтров не дал эффективных результатов (рис. 2)

Тогда было принято решение изменить подход. Изображение – это сигнал, который получается из суммы полезного сигнала и шума [1]. Исходя из этого определения, реализован следующий алгоритм.

1. Из исходного изображения выделяется канал, соответствующий цвету фона.
2. Копия изображения в красном канале размывается с помощью Гауссовского

³ Успенский В.М. Теория и практика диагностики заболеваний внутренних органов методом информационного анализа электрокардиосигналов. Пособие для врачей. — М.: «Экономика и информация», 2008.

⁴ Данные предоставлены ГБУ РО "Специализированная туберкулёзная больница"

⁵ Зудбинов Ю.И. Азбука ЭКГ. / Ю.И. Зудбинов. Изд. 3-е. Ростов-на-Дону: изд-во «Феникс», 2003. – 160с.

⁶ Мурашко В.В. «Электрокардиография» / В.В.Мурашко, А.В.Струтынский – 9-е изд. – М. МЕДпресс-информ, 2008 – 320 с. ил

фильтра.

3. Бинарное изображение временного ряда получается в результате применения формулы $s(n) = f(n) + \sigma \cdot e(n)$, где $f(n)$ – полезный сигнал, σ – уровень шума, $e(n)$ – гауссов белый шум, $s(n)$ – исходный сигнал. К изображению так же применяется пороговое преобразование.

4. Считывание сигнала происходит путем циклической обработки столбцов получившегося массива.

Этапы 2 и 3 проиллюстрированы на рис. 3.

Полученный вариант алгоритма не давал требуемый результат на всех тестовых данных. Из 156 обработанных кардиограмм 10 распознавались не полностью. Анализ показал, что на результат влияет параметр функции порогового преобразования. Для настройки параметров этой функции использована методика машинного обучения, где в качестве вектора признаков выступали цветовые и яркостные характеристики каждого столбца изображения.

Как во время снятия ЭКГ, так и во время её оцифровки на полученном сигнале могут возникнуть артефакты. Примерами таких артефактов выступают дрейф изолинии и сетевая наводка. Дрейф изолинии относится к низкочастотным артефактам и образуется, как правило, в результате сильных движений, поляризации электродов, погрешности аппарата или из-за плохого контакта с кожей. Для устранения помех такого рода рекомендуется использовать фильтр Баттерворта, заданный в дискретной частотной области как

$$|H(k)|^2 = \frac{1}{1 + (k/k_c)^{2N}},$$

где H – частотная характеристика аналогового фильтра, k_c – частота среза (рад/с), k – аналоговая частота в радианах.

Сетевая наводка обычно имеет частоту в 50 или 60 Гц. Данный артефакт устраняется путем применения режекторных и гребенчатых фильтров.

Выбор фильтров основывался на эмпирическом опыте и рекомендациях в литературе.

Синхронное устранение или усреднение по ансамблю используется, когда доступно много копий ЭКС. Шум является стационарным случайным процессом, а сам сигнал (квази-) периодический или циклически-стационарный. Фильтр скользящего среднего во временной области можно применять к статистически стационарным низкочастотным сигналам. Данный метод обеспечивает быструю фильтрацию в масштабах реального времени. Если же фильтрация в реальном масштабе времени не требуется, то используют фильтрацию в частотной области. Если есть информация по спектральной мощности или автокорреляционной функции сигнала и шума, то применяют оптимальный фильтр Винера. Если же шум некоррелирован с сигналом, помеха имеет нестационарный (и порой неслучайный) характер, дополнительной информации нет, но зато есть запись сигнала со второго источника, то используется адаптивная фильтрация.

Все изученные авторами методы обнаружения QRS-комплекса основываются на по-



Рис. 8. Иллюстрация шагов приведенного алгоритма

иске пика R и последующем удалении комплекса с копии ЭКС для последующего исследования. В исследовании рассмотрены методы, основанные на производной [2], на фильтре скользящего среднего, взвешенном и возведенном в квадрат операторе первой производной [3], алгоритм обнаружения QRS-комплекса Пана-Томпкинса [4]. Для комплексного подхода к обнаружению PQRST рассматривались алгоритмы, основывающиеся на дискретном вейвлет-преобразовании [5; 6], на преобразованиях «по длительности» [7].

Мы остановились на методе с дискретным вейвлет-преобразованием, так как он находит пики даже на сигнале с дрейфом изолинии.

Ранее распознанный сигнал загружается из файла. Проводится вейвлет-декомпозиция четвертого уровня (рис. 4), исходный сигнал раскладывается вейвлетом Добеши.

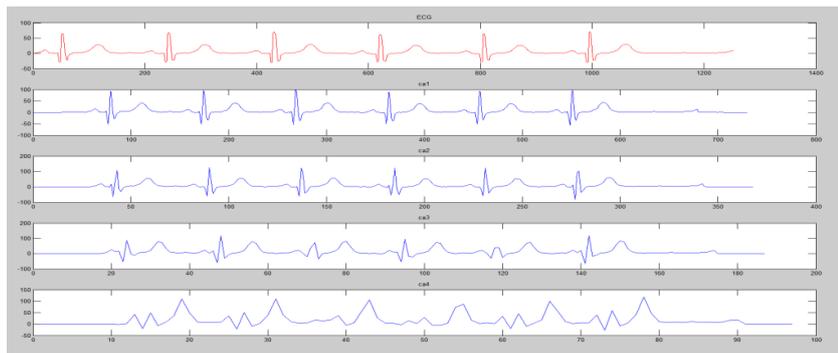


Рис. 9. График детализирующих коэффициентов

Извлекаются коэффициенты разложения, строится их график и анализируется оператором. Выбирается наиболее похожий на исходный сигнал коэффициент, но при этом уже очищенный от шумов. Ищутся все значения, превышающие 60% от максимума в выбранном уровне (рис.5).

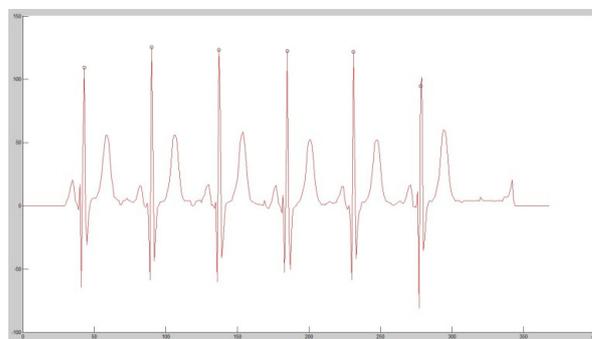


Рис. 10. Поиск R-зубцов на декомпозированном сигнале

Поскольку в этот массив могут попасть соседние значения, производится фильтрация слишком близких пиков. Компенсируется ошибка смещения относительно исходного сигнала. На основе обнаруженных позиций ищутся остальные пики. (рис. 6, 7).

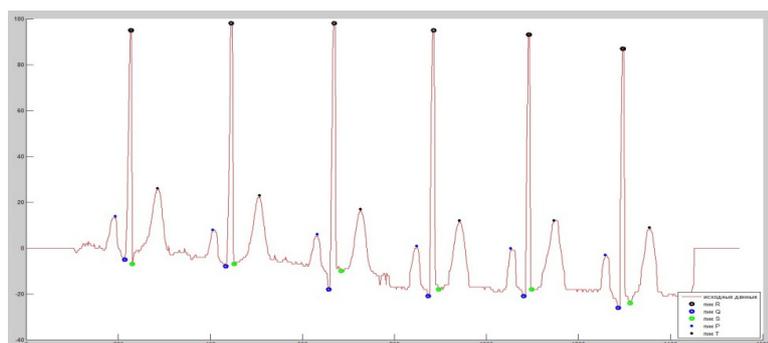


Рис. 11. Поиск зубцов на ЭКГ с дрейфом изолинии

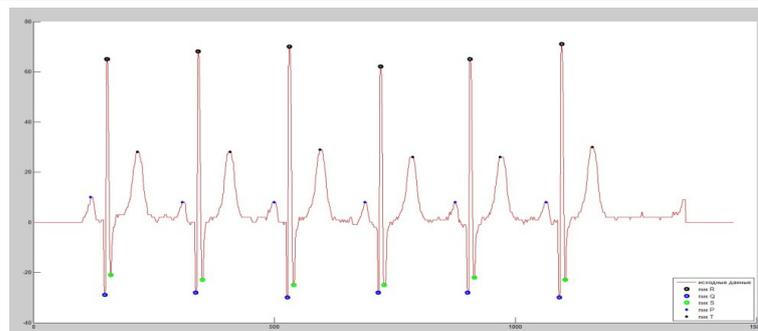


Рис. 12. Поиск зубцов на недекомпозированном сигнале

Во время наблюдения первичных манифестаций нежелательных побочных реакций на многомесячную противотуберкулезную химиотерапию у пациентов с коморбидной сердечнососудистой патологией был проведён сравнительный анализ динамических электрокардиографических изменений в виде различных аритмий и нарушений проводимости: ритм из правого предсердия – 18 случаев, атриовентрикулярная блокада I ст. – 7, полная блокада левой ножки пучка Гиса – 2, синдром Бругада – 7, синдром слабости синусового узла – 1, миграция водителя ритма по предсердиям – 2, фибрилляция предсердий – 10, удлинение интервала Q–T – 1, укорочение интервала P–Q – синдром преждевременного возбуждения желудочков сердца Клерка– Леви– Кристеско (CLC) – 12, фатальный синдром преждевременного возбуждения желудочков Вольфа– Паркинсона–Вайта (WPW), тип «Б» – 1, острый инфаркт миокарда с формированием патологического зубца Q – 3, острый инфаркт миокарда без зубца Q (-) но с подъёмом сегмента S–T – 3, синусовая тахикардия – 4, изолированный синдром ранней реполяризации желудочков – 4 пациента.

Всем 78 больным на фоне начатой с момента поступления в стационар химиотерапии противотуберкулезными препаратами с учётом безопасности лекарственных взаимодействий назначены: внутримитохондриальный цитопротектор – мексидол инфузионно 1000 мг/сутки до 15 дней, амиодарон от 400 до 800 мг/сутки – для 10 до 10 дней, пропafenон от 450 до 900 мг/сутки – для 14 до 30 дней, бисопролол от 5 до 10 мг/сутки – для 12 до 30 дней, метопролола сукцинат от 25 до 50 мг/сутки – для 28 до 30 дней, ивабрадин от 10 до 15 мг/сутки – для 16 пациентов. Электрокардиологический контроль проводился двукратно в течении первого месяца, далее – один раз в месяц.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты.

В процессе разработки программного обеспечения для структурного анализа кардиосигнала (ЭССАКС-ЭКГ «SERG») проведён анализ 156 электрокардиографических лент, снятых в приёмном покое стационара, переданных направившими учреждениями, снятых бригадами «Скорой помощи» и имеющимися в архивах обследуемых пациентов.

Удалось провести сравнительный количественный анализ изменения динамики электрокардиограмм представленных пациентами в сопроводительной документации, электрокардиографами приёмного покоя и стационарными в отделении функциональной диагностики.

Врач функционалист получил возможность представить врачу кардиологу объективно выполненный анализ величины амплитуды и временного интервала зубцов P, Q, R, S и T, сегментов, клинически значимого QRS-комплекса не только в миллиметровом и миллисекундном соотношении, но в процентном, что позволило значительно повысить объективность оценки динамики в критериях и коэффициентах, ранее указанных в пособиях и руководствах по кардиологии, но до сих пор крайне редко используемых практикующими врачами из-за большого объёма необходимых математических подсчётов.

Кардиолог, применив динамический анализ величин амплитуд и временных величин зубцов, сегментов и интервалов, успешно выполнил безопасную рациональную коррекцию доз медикаментозной нагрузки в более короткий срок до 2-3-х суток, вместо обычных 5-6 дней.

Дальнейшая разработка и внедрение в практику экспертных систем структурного анализа кардиосигнала значительно повысит качество кардиологического мониторинга пациента с коморбидной патологией повышенной сложности на междисциплинарном уровне.

Литература:

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Гонсалес Р., Вудс Р. – Издание 3-е, исправленное и дополненное. – Москва: Техносфера, 2012. 1104 с.
2. Ahlstrom M.L., Tomhins W.J. Digital filters for real-time ECG signal processing using microprocessors // IEEE Trans. Biomed. Eng. – 1985. – V. 32. – P. 708-713.
3. Murthy I.S.N., Rangaraj M.R. New concepts for PVC detection // IEEE Trans. Biomed. Eng. 1979. V. 26, No. 7. P. 409-416.
4. Pan J., Tomhins W.J. A real-time QRS detection algorithm // IEEE Trans. Biomed. Eng. 1985. V. 32. P. 230-236.
5. Khaled Daqrouq QRS Complex Detection Based on Symmlets Wavwlwt Function / Khaled Daqrouq, Ibrahim N. AbuIsbeih, Abdel-Rahman Al-Qawasmi // 5th International MultiConference on Systems, Signals and Devices. 2008.
6. Дубровин В.И. Усовершенствование методов анализа ЭКГ-сигналов на основе вейвлет-преобразования в системе электрокардиографии высокого разрешения / В. И. Дубровин, Ю. В. Твердохлеб // Радиоэлектроника, інформатика, управління. № 1. 2011. с 91
7. Gritzali F., Frangakis G., Papakonstantinou G. Detection of the P and T waves in an ECG // Comput. Biomed. Res. 1976. V. 9. P. 125-132

Electrocardiosignal structure analysis expert system development

Kristina Andreevna Krasovitskaya, master's student, Irkutsk National Research Technical University

Evgeniy Aleksandrovich Cherkachin, Senior reseacher, candidate of technical sciences, PhD,

Irkutsk National Research Technical University, Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch Academy of Sciences

The paper deals with the process of a cardiological expert system development. The definition of an electrocardiogram is presented. Problems of ECG characteristics determination such as ECG data digitizing are considered. The problem of QRS complex recognition and P and T waves parameters measurement is discussed. A general outline of analysis technique for ECG using wavelet transformation is proposed.

Keywords: ECG, analysis, biomedical signal, Machine Learning

УДК 519.6

СЛЕДЫ МОРСКИХ ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ: ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ

Михаил Александрович Курако, ст. преподаватель,

Тел.: 8 923 285 67 12, e-mail: mkurako@gmail.com

Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий

Константин Васильевич Симонов, профессор, д.т.н.,

Тел.: 8 913 595 4902, e-mail: simonovkv@ictm.krasn.ru

*Институт вычислительного моделирования СО РАН,
Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий*