

УДК 004.93.673: 61

Н. В. Белоус, Е. В. Высоцкая, Т. В. Жемчужкина, А. Н. Ковалев, Г. А. Кобзарь, А. П. Порван

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РАСПОЗНАВАНИЮ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКОГО СИГНАЛА В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

1. Введение

Исследование, обнаружение и диагностика заболеваний сердечно-сосудистой системы и, в частности, заболеваний сердца являются одной из важных проблем современной медицины. Одним из ведущих методов изучения биоэлектрической активности сердца является электрокардиография. Она на сегодняшний день незаменима в диагностике инфарктов миокарда, ишемической болезни сердца, нарушений ритма и проводимости, гипертрофий предсердий и желудочков и других заболеваний сердца. Использование традиционно применяемых методов не всегда оказывается эффективным, о чем свидетельствует тот факт, что число неточных диагностических заключений до сих пор достаточно велико. Одной из сложных проблем является большой объем трудозатрат медперсонала на получение точного диагноза, который иногда ставится лишь после смерти больного.

Поток электрокардиограмм (ЭКГ), в большинстве случаев не содержащих признаков сердечно-сосудистых патологий, перегружает врачей-кардиологов, что ведет к ослаблению их внимания, переутомлению и, как следствие, к пропуску пограничных случаев или неточной дифференциальной диагностике.

Важно определить оптимальный набор структурных параметров электрокардиографического сигнала, обеспечивающих наиболее достоверную диагностику, а также разработать методы выделения и обработки характерных структур регистрируемого сигнала [1].

При визуальном анализе ЭКГ часто не принимаются во внимание или не замечаются его незначительные изменения, в которых может содержаться информация о важных нюансах в работе сердца. Эти незаметные на глаз отклонения от нормы могут развиваться в патологии, поэтому автоматизированный анализ ЭКГ является основным направлением в развитии кардиологических систем. Такие системы предназначены для выделения электрокардиосигналов (ЭКС) в норме и подсказки врачу-кардиологу наиболее вероятных кардиологических синдромов, содержащихся в пограничной и патологических группах ЭКС.

В настоящее время известно большое число алгоритмов автоматического анализа ЭКГ, разнообразие которых определяется:

- спецификой задачи (диагностика, мониторинг, слежение за состоянием пациента, оценка состояния оператора, профилактическое обследование и т. п.);

- спецификой анализа ЭКГ, регистрируемой в покое или при нагрузке;
- использованием различных систем отведений и методов получения вторичного описания ЭКГ и его диагностической интерпретации;
- способами реализации алгоритма (программой для ЭВМ или в виде специализированного вычислительного устройства).

Специфика задач, решаемых при анализе ЭКГ, накладывает свой отпечаток прежде всего на сложность возможных алгоритмов обработки.

При мониторингном слежении важна оперативность получения информации, что ведет к упрощению методов анализа для повышения их быстродействия. Для функциональной диагностики главное — точность и достоверность результатов, поэтому здесь возможно применение очень сложных алгоритмов анализа.

Анализаторы ЭКС кардиологических систем строятся на базе различных методов автоматического анализа ЭКГ. Большинство таких методов являются производными мануальных методов, которые используют кардиологи во врачебной практике в отсутствие автоматизированных компьютерных кардиологических систем (структурные методы). Врачебные признаки характеризуют амплитуду и длительность зубцов ЭКС, полярность, скорость изменения, расщепление, интервалы времени между зубцами. Такие методы обладают рядом достоинств: простота реализации, быстродействие, наглядность. Основным недостатком этих методов — неадекватное использование вычислительной мощности современной компьютерной техники.

В данной статье предлагается подход к анализу ЭКС в целом с использованием современных методов быстрого распознавания сигналов по форме. Этот подход предусматривает архивацию эталонов ЭКС в определенном формате, а также быструю идентификацию участков ЭКС по созданной базе эталонов.

2. Анализ существующих методов

Основой для построения алгоритмического и программного обеспечения большинства автоматизированных систем служит следующая последовательность этапов обработки ЭКГ-сигнала: ввод ЭКГ; предварительная обработка сигнала; распознавание характерных элементов; определение информативных параметров и их анализ; интерпретация результатов анализа.

Ввод ЭКГ подразумевает дискретизацию и квантование сигнала, предобработка — цифровую фильтрацию для устранения шумов и помех. Наиболее важным этапом обработки сигнала ЭКГ является распознавание элементов сигнала (QRS-комплекса) и выявление его характерных точек (вершин и границ зубцов), что дает возможность определить важные характеристики ЭКГ-сигнала — амплитуды и длительности всех зубцов и сегментов. При анализе ЭКГ первостепенный интерес для врача представляют временная эволюция и статистика распределения структурных параметров: временных интервалов и амплитуд. Поэтому важную группу составляют методы, основанные на автоматическом определении параметров, используемых врачом при расшифровке ЭКГ. К ним относятся значения амплитуд и длительностей зубцов ЭКГ, а также интервалов между ними.

На сегодняшний день разработано большое количество разнообразных методов автоматизированного анализа ЭКГ [2]. Большое разнообразие существующих методов обусловлено как различием решаемых задач, так и спецификой исследуемых параметров сигнала. Можно выделить три основные группы методов анализа ЭКС:

- методы, основанные на анализе производной сигнала, использующие пороговые значения производной для каждого из зубцов ЭКГ, а также временные маски (временной интервал, в пределах которого ожидается появление зубца);
- структурные методы, основанные на предварительной сегментации сигнала с представлением его в виде последовательности простейших элементов и последующим грамматическим разбором получаемой цепочки символов;
- корреляционные методы, использующие анализ корреляционной функции между ЭКГ-сигналом и образцами желудочкового комплекса.

Достоинством первых двух групп методов является простота реализации, недостатком является разбиение кардиосигнала на отдельные участки.

Корреляционные методы анализируют кардиосигнал в целом, что является достоинством этого метода, однако при таком подходе количество вычислительных операций при сравнении анализируемого кардиосигнала с набором эталонных форм кардиоциклов значительно возрастает. Таким образом, актуальными являются задачи оптимизации размера эталонов и разработки методов идентификации входного сигнала по базе эталонов с целью построения системы распознавания ЭКС в реальном времени.

3. Распознавание ЭКС как единого целого

Предлагается использовать непосредственное распознавание участков ЭКС с помощью методов распознавания по форме. Такой подход предполагает рассмотрение сигнала как единого целого, но при этом позволят оценить его локальные характери-

сти, избегая проблем зашумления в большинстве случаев.

Одной из основных задач при реализации предложенного подхода непосредственного распознавания ЭКГ сигнала по форме является разработка информативного представления формы (или дескриптора) сигнала. К настоящему времени разработаны три дескриптора формы, которые в наибольшей степени удовлетворяют требованиям устойчивости, компактности, вычислительной простоте извлечения: дескрипторы Фурье (FD — Fourier descriptors), дескрипторы скалярного пространства кривизны (CSSD — curvature scale space descriptors), а также сеточные дескрипторы (GD — grid descriptors).

В целом, существуют только два типа дескрипторов формы: контурные и областные. FD и CSSD являются контурными представлениями, а GD — областные. Областные дескрипторы не подходят для распознавания сигнала, так как подразумевают оценку замкнутой формы. Однако GD метод можно применить к сигналу, рассматривая область, ограниченную сигналом сверху, как объект для распознавания.

Таким образом, для обеспечения распознавания интервалов ЭКГ сигналов необходимо создать базу эталонов, представленных в соответствии с одним из существующих дескрипторов. Базу эталонов можно сформировать, используя существующие таблицы ЭКГ, открытые базы ЭКГ в сети Интернет (Германия, Япония, США) [3].

Рассмотрим и проведем анализ перечисленных дескрипторов на предмет их применения в качестве базы для распознавания ЭКС.

4. Разработка эффективного подхода представления и распознавания ЭКС

Дескрипторы Фурье вычисляются с помощью преобразования Фурье, применяемого к преобразованному сигналу (первая и вторая производная, кривизна и др.; в качестве входных данных можно использовать и исходный сигнал). Полученные коэффициенты Фурье называют дескрипторами Фурье. Чтобы обеспечить применение преобразования Фурье, необходимо нормировать количество точек дискретного сигнала. Дискретное преобразование Фурье последовательности точек будет иметь следующий вид:

$$u_n = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} r_i \exp\left(\frac{-j2\pi ni}{N}\right), \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

где N — количество точек последовательности, r_i — значения в точках последовательности.

Коэффициенты u_n , $n=0, 1, \dots, N-1$, обычно называют дескрипторами Фурье (ДФ) формы и записывают в виде FD_n , $n=0, 1, \dots, N-1$ [4].

Для оценки сходства анализируемой формы и целевой формы из базы данных используется простое евклидово расстояние между векторами признаков анализируемого и эталонного сигнала. Преобразо-

вание Фурье позволяет ориентироваться как на мелкие детали формы, так и структуру формы в целом, в зависимости от того, какого порядка коэффициенты используются. Для дескрипторов Фурье не существует проблемы шумов — их воздействие отражается только на высоких частотах, которые чаще всего отбрасываются. Небольшие изменения контуров формы незначительно отражаются на виде конечного представления. Благодаря применению быстрого преобразования Фурье (FFT), процесс извлечения дескрипторов очень эффективен. Недостатком дескрипторов Фурье является невозможность оценки локальных характеристик формы, так как известны только абсолютные величины частот, а их положение не известно.

5. Дескриптор CSS

Дескрипторы CSS (curvature scale space — скалярное пространство кривизны) предназначены для представления локальных ключевых характеристик формы. Представление сигнала в скалярном пространстве позволяет определять не только положения вогнутостей (или выпуклостей) линии сигнала, но и степень искривления. Первым шагом извлечения дескриптора CSS является построение карты CSS. Для построения карты CSS вычисляется кривизна точек формы (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, L$:

$$k_i = (\dot{x}_i \ddot{y}_i - \ddot{x}_i \dot{y}_i) / (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2)^{3/2}, \quad (2)$$

где $\dot{x}_i, \dot{y}_i$ и $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i$ — первые и вторые производные в точках сигнала с индексом i соответственно.

Затем определяются точки перегиба. После этого сигнал подвергается гауссовому сглаживанию для перехода к следующему измерению (итерации). Этот процесс продолжается до тех пор, пока можно найти точки перегиба. Результирующая карта CSS представляет собой композицию всех точек перегиба $z_c(i, \sigma)$, где i — одномерная координата точки сигнала, σ — итерация, на которой z_c была найдена. Затем извлекаются пики полученной карты (не ниже некоторого порогового значения), которые записываются в убывающем порядке и таким образом формируют дескриптор CSS, позволяющий идентифицировать сигнал по форме [5].

Сходство двух форм измеряется с помощью суммы разностей всех совпадающих пиков и значений несовпадающих пиков. Достоинством дескрипторов CSS является способность оценки локальных ключевых признаков, таких как положение и степень вогнутости (выпуклости) сегментов линии сигнала. Эти признаки играют важную роль в человеческом восприятии при оценке сходства двух форм. Размер дескрипторов CSS невелик, и представление является устойчивым благодаря применению гауссового сглаживания. Однако дескрипторы CSS описывают только локальные ключевые признаки. Глобальные признаки, которые также очень важны для объек-

тивного представления форм, не учитываются. Поэтому такие глобальные признаки, как изменение среднего значения сигнала, должны быть включены в набор CSS для получения более объективного представления.

6. Сетчатые дескрипторы

Для получения сетчатого представления сигнал проектируется на квадратичную сетку фиксированного размера. Ячейки сетки, лежащие под линией сигнала, получают значение 1, 0 — если лежат выше. Индекс сигнала, представленный бинарной последовательностью, генерируется последовательным сканированием сетки слева направо и сверху вниз. Эта бинарная последовательность используется в качестве дескриптора формы.

Расстояние между двумя наборами сетчатых дескрипторов измеряется просто количеством отличающихся элементов. Это наиболее простой с вычислительной стороны метод распознавания, однако наименее устойчивый к помехам. Кроме того, наложение низкочастотных колебаний большой амплитуды на сигнал ЭКГ (что нередко происходит) влечет за собой кардинальное изменение дескриптора.

7. Построение кардиологической системы на основе предложенного подхода.

Ограничения подхода и их устранение

Из приведенного выше анализа достоинств и недостатков дескрипторов формы применительно к задаче распознавания сигнала ЭКГ по форме следует, что наиболее помехоустойчивым является метод распознавания, основанный на дескрипторе Фурье. Однако данный дескриптор не отражает сугубо локальные изменения сигнала, которые имеют критическое значение при анализе ЭКГ, так что дескриптор Фурье может быть использован на начальной стадии при распознавании сигнала ЭКГ для определения группы (широкого класса) сигнала. Выделенный недостаток устраняется последующим уточнением классификации сигнала с помощью CSS дескриптора. Применение сетчатого дескриптора для анализа ЭКГ не представляется эффективным.

Недостатком предлагаемого подхода является необходимость точного выделения RR интервалов ЭКС на предварительном этапе, что не всегда возможно. Неточное выделение участка ЭКС, ограниченного R зубцами, повлечет за собой ошибочную идентификацию и некорректный диагноз. Этот недостаток можно устранить, включив в этап предварительной обработки контроль variability сердечного ритма (к настоящему времени разработано множество методов оценки), а также усреднение сигнала по N участкам [6]. Число N необходимо в дальнейшем определить эмпирическим путем.

На рис. 1 представлена предлагаемая схема поэтапной идентификации ЭКС.

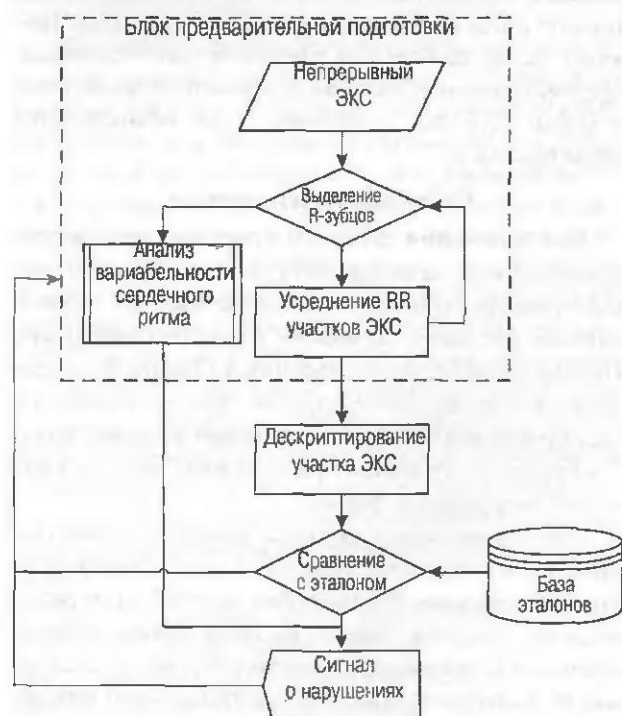


Рис. 1. Схема идентификации ЭКС

Локализация *R* зубцов осуществляется стандартными средствами (анализ производной сигнала, оценка кривизны). Для анализа вариабельности сердечного ритма также предлагается использование новейших методов. Описание этих двух эталонов выходит за рамки тематики данной статьи.

Усреднение участков ЭКС осуществляется с целью устранения шумов. Внештатные ситуации (экстрасистолы, нарушения сердечного ритма, связанные с выпадением QRS комплекса, и др.) рассматриваются отдельно на этапе анализа вариабельности сердечного ритма.

Под дескрипированием подразумевается формирование вектора признаков входного участка ЭКС согласно выбранным дескрипторам CSS и Фурье. На этапе сравнения происходит сопоставление полученного вектора признаков с эталонами базы ЭКС для распознавания ЭКС.

По результатам анализа вариабельности сердечного ритма и распознавания сигнала с помощью ба-

зы эталонов выдается сигнал о нормальном состоянии пациента или каких-либо нарушениях с указанием этих нарушений.

8. Выводы

В данной статье рассмотрена проблема распознавания ЭКС в реальном масштабе времени. Большинство существующих кардиологических систем основаны на подходе к анализу ЭКГ, который применяют кардиологи в повседневной практике. Этот подход не в полной мере использует вычислительную мощность и аналитические возможности современных компьютерных технологий. Предлагается подход к распознаванию участков ЭКС, ограниченных RR интервалом, как единого целого без какого-либо дополнительного деления сигнала. Этот подход отличается от корреляционного тем, что эталоны базы распознавания представляют собой векторы признаков эталонных ЭКС, извлеченных автоматически в соответствии с определенными дескрипторами формы сигнала (CSS и Фурье), что позволяет значительно уменьшить объем базы эталонов и, соответственно, ускорить процесс распознавания.

Список литературы: 1. Горбунова Е. В. Исследование и разработка методов оценивания контролируемых параметров сигналов в автоматизированных кардиологических комплексах. – Барнаул: АлтГТУ, 1999. 2. Garvey J. Lee. ECG Techniques and Technologies // Emerg. Med. Clin. – 2006. – No. Am 24. – P. 209–225. 3. PhysioNet the research resource for complex physiologic signals. – <http://physionet.ph.biu.ac.il/>, 2006. 4. Zhang D. S., Lu G. J. Shape Retrieval Using Fourier Descriptors // Int. Conf. on Multimedia and Distance Education, Fargo, ND, USA, June 2001. 5. Mokhtarian F., Abbasi S., Kittler J. Efficient and Robust Retrieval by Shape Content through Curvature Scale Space // Int. Workshop on Image DataBases and Multimedia Search. – Amsterdam, 1996. – P. 35–42. 6. Москаленко А. В., Кукушкин Н. И., Стармер Ч. Ф. и др. Количественный анализ вариабельности электрокардиограмм, типичных для полиморфных аритмий // Биофизика. – 2001. – Т. 46, вып. 2. – С. 319–329.

Поступила в редколлегию 16.08.2006