А.И. Малахов, С.И. Щукин, В.И. Иванцов, А.Н. Тихомиров

Комбинированный алгоритм выявления и дифференцирования трепетаний и фибрилляций предсердий на основе анализа электрокардиосигнала

Аннотация

В статье описывается алгоритм автоматического выявления трепетаний и фибрилляций предсердий. Алгоритм основан на анализе интервалов между R-зубцами (RR-интервалы), проценте длительности P-зубцов по отношению ко всему сигналу (SP), а также на анализе диаграммы корреляционных коэффициентов, которая применяется для регистрации P-зубцов. Перечисленные параметры применялись в разных комбинациях для выявления трепетания предсердий (ТП) и фибрилляции предсердий (ФП) в зависимости от частоты сердечных сокращений (ЧСС). В результате было выявлено, что при ЧСС выше 120 уд/мин достаточно анализировать длительности RR-интервалов и параметр SP, а при ЧСС ниже 120 уд/мин необходимо сравнивать ЧСС с частотой следования P-зубцов (ЧСП). Определено, что граничное значение SP для ФП составляет 25 %.

Аритмии являются распространенной патологией. Они могут возникать как при различных заболеваниях сердечно-сосудистой системы, так и при отсутствии каких-либо признаков ее поражения. Как минимум у 40 % здоровых лиц при холтеровском мониторировании электрокардиограммы (ЭКГ) в течение 24-48 ч обнаруживаются желудочковые аритмии, в том числе у 1-4 % – сложные [1]. При этом у здорового человека в норме за сутки может возникать до 500 экстрасистол [2].

Предсердные аритмии не считаются жизнеопасными. Они встречаются достаточно часто, но обычно не имеют отрицательного прогностического значения. Однако предсердные тахикардии являются наиболее частым выражением левожелудочковой недостаточности сердца, что приводит в 30...50 % случаев к смерти пациента. Поэтому предсердные аритмии необходимо выявлять и дифференцировать с высокой степенью надежности. В настоящей статье описывается алгоритм автоматического выявления трепетаний и фибрилляций предсердий, которые возникают при заболеваниях сердца.

Целью работы является разработка алгоритма выявления таких опасных предсердных аритмий, как трепетание предсердий (ТП) и фибрилляция (мерцание) предсердий (ФП).

Задачи, которые были поставлены при создании алгоритма, следующие:

- быстрый анализ электрокардиосигнала (ЭКС) с выявлением предсердных аритмий при длительности входного сигнала до 10 с;
- точная дифференциация ТП или ФП.

Методы и средства

Большинство методов выявления аритмий основано на анализе длительности RR-интервалов и изменений значений ΔRR [3]. При этом оптимальные длительности записей электрокардиосигнала (ЭКС) составляют в среднем порядка 60 с.

Для ФП характерно отсутствие зубцов P на электрокардиограмме, что отражает деполяризацию предсердий. Вместо них появляется множество волн f, которые характеризуют фибрилляцию предсердий. При ТП наблюдается неполная предсердно-желудочковая блокада, которая на электрокардиограмме проявляется наличием правильных P-зубцов, но частота сокращений предсердий в несколько раз выше частоты сокращений желудочков. Поэтому для правильного восприятия работы сердца человека недостаточно определения одного-двух параметров. Необходимо рассмотрение нескольких параметров во взаимосвязи друг с другом.

В данной статье рассматривается возможность одновременного применения нескольких методик выявления как ТП, так и ФП. Используется анализ длительности RR-интервалов, анализ процентного отношения длительности зубцов P ко всей длительности сигнала на основании работы [4] (параметр SP), а также корреляционный анализ P-зубцов.

Анализ длительности RR-интервалов позволяет выявлять ФП, однако он не дает возможности отличить ТП от фибрилляции. Анализ процентного отношения длительности зубцов, превышающих граничное значение, к длительности всего сигнала с успехом применяется для определения фибрилляции желудочков [4]. Поэтому было решено исследовать данный параметр для анализа предсердных аритмий. Это отношение не зависит от взаимного расположения важных точек на ЭКГ-сигнале, в частности от расположения P-зубцов. Поэтому для определения ТП основой алгоритма является корреляционный анализ, позволяющий точно выявлять P-зубцы. Было выявлено, что для повышения точности определения вида аритмии нужно, чтобы как минимум два параметра указывали на ту или иную аритмию.

Общий алгоритм обработки ЭКС и выявления аритмий приведен на *рис. 1*.

После предварительной обработки ЭКС производится вырезание QRS-комплексов для определения параметра SP. Такой сигнал будем называть вырезанным. После этого определяется граничное значение, равное 10 % от максимума амплитуды вырезанного сигнала [4]. SP вычисляется как процентное отношение длительности зубцов, превышающих граничное значение, к длительности всего сигнала. При этом не учитываются зубцы, длительность которых меньше 20 мс, а также вырезанные QRS-области сигнала.

При высоких значениях частоты сердечных сокращений (ЧСС) корреляционный анализ не позволяет точно определять положение P-зубцов, что накладывает ограничения на возможности выявления ТП. К тому же ТП характеризуется частотой следования P-зубцов, равной 300...400 уд/мин, и частичной блокадой проводимости управляющих импульсов от предсердий к желудочкам. В этом случае ЧСС обычно составляет около 100 уд/мин. Поэтому, в зависимости от ЧСС, применяется один из двух вариантов анализа ЭКС.

Первый вариант используется при ЧСС > 120 уд/мин и основан на анализе ЧСС, длительности RR-интервалов и определении параметра SP. Второй – при ЧСС < 120 уд/мин, основан на анализе ЧСС и построенной диаграммы коэффициентов корреляции текущего сигнала с идеальным P-зубцом.

Для получения диаграммы коэффициентов корреляции использовалось последовательное сравнение отрезка ЭКС длительностью 84 мс каждый, чуть больше сред-

ней длительности нормального Р-зубца, с записанным идеальным Р-зубцом, полученным с модулятора ЭКС MS410 «ECG Simulator».

Для получения каждого коэффициента используется формула (1):

$$r_{XY_j} = \frac{\sum_{i=j-20}^{j+20} (X-\overline{X})(Y-\overline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=j-20}^{j+20} (X-\overline{X})^2 \sum_{i=j-20}^{j+20} (Y-\overline{Y})^2}}, \quad (1)$$

где j – значение текущего отсчета; X – значение i-го отсчета исходного ЭКС; $\overline{X}$ – среднее значение исходного сигнала; Y – значение i-го отсчета сигнала Р-зубца; $\overline{Y}$ – среднее значение сигнала Р-зубца.

Для апробации алгоритмов использовались сигналы с модулятора ЭКС MS410 «ECG Simulator», а также сигналы из библиотек «PhysioNet» [5] (базы данных afdb, itafdb).

Результаты

При ЧСС ≥ 120 уд/мин проверяются длительности RR-интервалов и параметр SP вырезанного сигнала. Установлено, что при превышении значения SP 25 % и/или при явном выпадении RR-интервалов из области (RRср ± 15) % (где RRср – среднее значение RR-интервалов) определяется ФП.

Например, сигнал из базы данных afdb 08219 (MIT-BIH Atrial Fibrillation Database) демонстрирует фибрилляцию предсердий. Значение SP = 31 %. На диаграмме (*рис. 2б*) виден нерегулярный ритм сердца.

При ЧСС < 120 уд/мин проверяются SP, частота сокращений предсердий ЧСП, определяемая из анализа коэффициентов корреляции (КК). При превышении SP-значения на 25 % и ЧСП >> ЧСС определяется ФП. При ЧСП > ЧСС и регулярности Р-зубцов по амплитуде и частоте определяется ТП.

Для сигнала, полученного с помощью симулятора аритмий (*рис. 3*), рассчитанное значение SP = 23 %. При

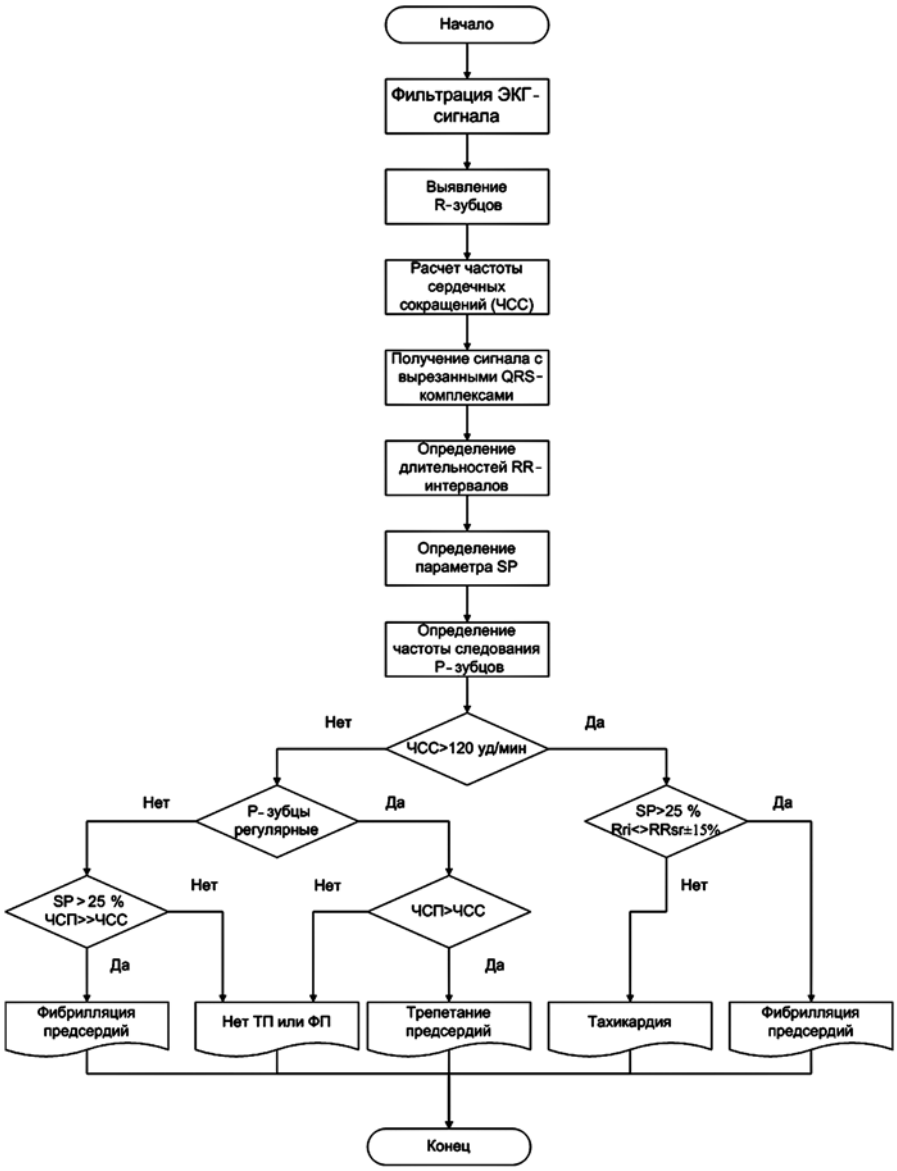

Рис. 1. Алгоритм выявления трепетания и фибрилляций предсердий

этом на диаграмме коэффициентов корреляции наблюдаются регулярные Р-зубцы, частота которых почти вдвое больше ЧСС (120 мин$^{-1}$ против 69 мин$^{-1}$ соответственно).

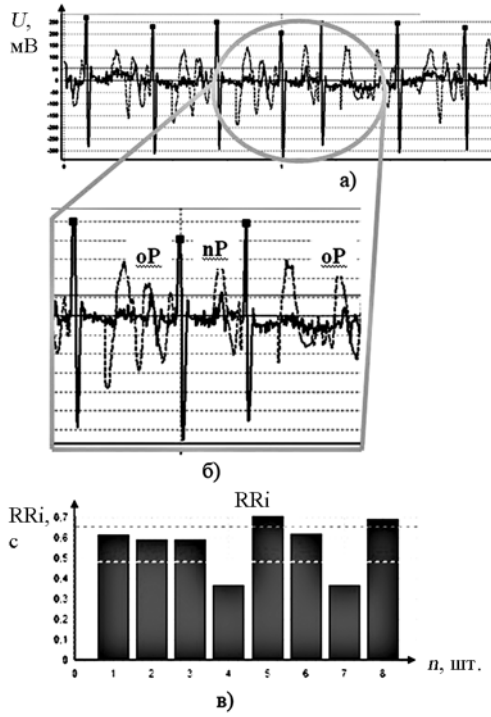

Рис. 2. Результаты обработки сигнала afdb08219: сплошной график – исходный сигнал с ЧСС = 123 уд/мин (а); пунктирный график – диаграмма коэффициентов корреляции; увеличенный график, на котором видно в одном случае отсутствие зубца Р (nP), в другом – неправильная форма Р-зубца (oP) (б). Ритм сердца нерегулярный; гистограмма длительностей RR-интервалов, где виден нерегулярный ритм сердца (в)

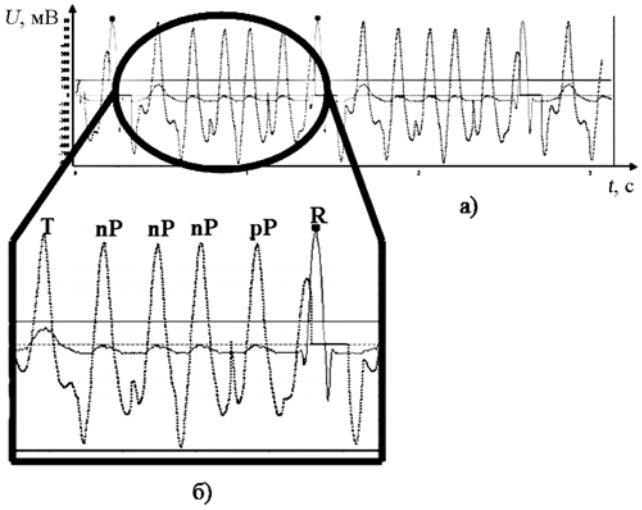

Рис. 3. Результаты обработки сигнала, полученного с симулятора аритмий «MS410 ECG Simulator»: сплошной график – исходный ЭКС с трепетанием предсердий, ЧСС = 69 уд/мин; пунктирный график – диаграмма коэффициентов корреляции: обозначения: nP – внеочередной Р-зубец, pP – верный Р-зубец; проведение импульса к желудочкам происходит только с каждого четвертого Р-зубца

Обсуждение

Для более точного выявления аритмий необходим комплексный анализ сигнала, основанный на одновременном использовании разных методик обработки ЭКС. Предложенный алгоритм основан на анализе интервалов между R-зубцами (RR-интервалы), процента длительности Р-зубцов по отношению ко всему сигналу, а также на анализе диаграммы корреляционных коэффициентов, которая применяется для регистрации Р-зубцов. Перечисленные параметры применялись в разных комбинациях для выявления трепетания предсердий и фибрилляции предсердий в зависимости от частоты сердечных сокращений. В результате было выявлено, что при ЧСС выше 120 уд/мин достаточно анализировать длительности RR-интервалов и параметр SP. Установлено, что неправильный ритм и значение SP выше 25 % указывают на ФП. При ЧСС ниже 120 уд/мин необходимо сравнивать ЧСС с частотой следования Р-зубцов (ЧСП). Если ЧСП больше ЧСС и ритм Р-зубцов постоянный, то следует классифицировать такую аритмию как ТП. Однако если ЧСС < 120 уд/мин, а ЧСП очень высокая и значение SP превышает 25 %, то в таком случае выявляется ФП.

Заключение

Предложенный алгоритм позволяет выявлять опасные аритмии предсердий и дифференцировать трепетание предсердий от фибрилляции предсердий. Отличительными особенностями нашего алгоритма являются возможность определять не только ФП, но и ТП, а также малая длительность входного сигнала, что может облегчить работу медицинского персонала. Было выявлено, что для наилучшей работы алгоритма требуется входной сигнал, достаточно точно приведенный к изолинии. Дальнейшие исследования будут направлены на получение сравнительных данных по отношению к другим известным алгоритмам выявления ФП, а также на повышение точности пороговых значений, по которым определяется тот или иной вид аритмии.

Список литературы:

1. *Амосова К.М.* Клиническая кардиология. В 2 т. – К.: Здоровье, А62, 2002. Т. 2. С. 285.
2. *Нестеров В.Г., Титова Т.С., Титова Л.С., Нестеров Д.В.* Значение суточного мониторирования при электрокардиографическом обследовании больных раком шейки матки // Фундаментальные исследования. 2007. № 11. С. 143.
3. *Larburu N., Lopetegi T., Romero I.* Comparative study of algorithms for atrial fibrillation detection // Computing in cardiology. 2011.
4. *Arafat M.A., Chowdhury A.W., Hasan Md.K.* A simple time domain algorithm for the detection of ventricular fibrillation in electrocardiogram. – Springer Link. Signal, image and video processing, 2009.
5. http://www.physionet.org/cgi-bin/atm/ATM.

Артем Игоревич Малахов,
аспирант, инженер,
НИИ БМТ,
Сергей Игоревич Щукин,
д-р техн. наук, профессор,
зав. кафедрой «Медико-технические информационные технологии»,
Владимир Иванович Иванцов,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра «Биомедицинские технические системы»,
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Алексей Николаевич Тихомиров,
аспирант, инженер,
НИИ БМТ,
г. Москва, e-mail: malahart@mail.ru