

Алгоритмы выделения кардиоциклов для метода электрокардиографии сверхвысокого разрешения

А.С. Афанасенко
Институт аналитического
приборостроения РАН,
Государственный университет
аэрокосмического приборостроения
Санкт-Петербург, Россия
ar.afanasenko@gmail.com

Е.П. Логачев
Институт аналитического
приборостроения РАН
Санкт-Петербург, Россия
zhenya.logachev.94@mail.ru

А.А. Кордюкова
Институт аналитического
приборостроения РАН
Санкт-Петербург, Россия
annygm00@mail.ru

Е.А. Денисова
Институт аналитического
приборостроения РАН
Санкт-Петербург, Россия
tiranderel@yandex.ru

Д.О. Шевяков
Институт аналитического
приборостроения РАН,
Государственный университет
аэрокосмического приборостроения
Санкт-Петербург, Россия
sevakovdaniil@gmail.com

В.В. Давыдов
Санкт-Петербургский
Политехнический Университет
Петра Великого
davydov_vadim66@mail.ru

Аннотация — Работа посвящена выбору наиболее предпочтительного алгоритма выделения R-зубцов кардиоциклов электрокардиосигналов сверхвысокого разрешения. Для этого проводится сравнительная оценка работы предложенных алгоритмов с выделением R-зубцов ручным методом. Это позволит проводить изучение высокочастотных низкоамплитудных составляющих электрокардиосигналов, регистрация которых проводится с помощью нового авторского метода электрокардиографии сверхвысокого разрешения (ЭКГ СВР). Благодаря выделению кардиоциклов становится возможным более точно сопоставить изменения спектральной плотности мощности с моментом начала развития острой ишемии у подопытной крысы.

Ключевые слова — выделение кардиоциклов, электрокардиография сверхвысокого разрешения, моделирование острой ишемии, подопытные крысы, спектральный анализ

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы активно ведется разработка новых электрокардиографических (ЭКГ) методов, основанных на усовершенствовании аппаратных, алгоритмических и программных средств снятия и регистрации электрокардиосигналов (ЭКС). Одним из них является новый авторский метод электрокардиографии сверхвысокого разрешения (ЭКГ СВР), основное отличие которого заключается в регистрации ЭКС в расширенных амплитудном и частотном диапазонах. Это позволяет получить новую, ранее недоступную для анализа ЭКГ-информацию о развитии патологий сердечно-сосудистой системы, в частности, ишемической болезни сердца – одной из причин смертности и инвалидизации населения [2]. Разработка метода ЭКГ СВР активно ведется в лаборатории "Радио- и оптоэлектронных приборов ранней диагностики патологий живых систем" Института аналитического приборостроения РАН под руководством д.т.н, проф., Зайченко К.В [1].

Для апробации метода на базе Института экспериментальной медицины ФГБУ "НМИЦ им. В.А. Алмазова" проводятся серии экспериментов по

моделированию острой ишемии миокарда на подопытных крысах, во время которых осуществляется регистрация и запись электрокардиосигналов сверхвысокого разрешения (ЭКС СВР) [3]. Эти сигналы регистрируются с двух каналов – низкочастотного (НЧ), соответствующего стандартной ЭКГ, и высокочастотного (ВЧ), содержащего микропотенциалы. Для последующей обработки и изучения ЭКС СВР, записанных в ВЧ-канале требуется разработать программный комплекс, одной из задач которого является выделение всех кардиоциклов, регистрируемых в НЧ-канале. Это позволит сопоставить этим циклам соответствующие участки ЭКС СВР в ВЧ-канале.

Большинство существующих алгоритмов выделения кардиоциклов предложены только для стандартных методов ЭКГ, частота дискретизации которых составляет, примерно, 250 Гц [4]. Эти алгоритмы не могут применяться в методе ЭКГ СВР, поскольку за счёт расширения частотного и амплитудного диапазонов регистрации ЭКС СВР, частота дискретизации составляет 6250 Гц, а разрядность 16 бит.

2. СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ВЫДЕЛЕНИЯ КАРДИОЦИКЛОВ

В данной работе нами предложены алгоритмы выделения R-зубцов, а именно, градиентный [5] и основанный на преобразовании Гильберта. Стоит отметить, что предложенные алгоритмы не зависят от частоты дискретизации, что является одним из критериев для метода ЭКГ СВР.

Алгоритм основанный на преобразовании Гильберта использует в качестве решающей функции мгновенную мощность огибающей сигнала. Она рассчитывается умножением аналитического сигнала на комплексно сопряженный ему, который рассчитывается при помощи преобразования Гильберта.

Градиентный метод, в свою очередь, в качестве решающей функции использует градиент, рассчитанный при помощи первой деленной центральной разности. Сам градиент представляет собой вектор, указывающий рост потенциала электрического поля сердца.

На Рис.1 приведены результаты применения перечисленных алгоритмов выделения R-зубцов на ЭКС, полученных с помощью метода ЭКГ СВР во время экспериментов на подопытных крысах. Опорной точкой при детекции R-зубца являются максимумы решающих функций. Отметим, что на протяжении всего экспериментального процесса на ЭКС СВР воздействуют помехи, связанные с сетью переменного тока, тремором мышц и тд. Для улучшения работы алгоритмов, приведенный ЭКС с НЧ-канала был предварительно отфильтрован. Также, для дальнейшего сравнения результатов выделения R-зубцов приведенными алгоритмами, проведено их ручное выделение на том же участке ЭКС в НЧ-канале (Рис.2).

Для оценки алгоритмов используется расчет среднеквадратической ошибки между разметками, полученными при помощи каждого алгоритма и проведенной вручную, а также измерение быстродействия работы их программной реализации. В Таблице I приведены результаты расчета описанных параметров.

Таблица I. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ

Алгоритм	Время работы, с	СКО
Градиентный	0.0018	19.84
Использующий преобразование Гильберта	0.0022	11.71

Из Таблицы I видно, что наилучший результат по предложенным нами характеристикам оценки работы алгоритмов является алгоритм, основанный на преобразовании Гильберта.

Как было отмечено ранее, выделение кардиоциклов ЭКС необходимо для последующего анализа ЭКС СВР, регистрируемых в ВЧ-канале. Интерес представляет проведение спектрального анализа в зонах каждого кардиоцикла для дальнейшей оценки изменения мощности спектра всего сигнала. Для этого, высокочастотный сигнал делится на временные интервалы, соответствующие выделенным в низкочастотном сигнале кардиоциклам. После чего, на каждом выделенном интервале проводится расчет спектральной плотности мощности и вычисляется ее среднеквадратическое отклонение (СКО). График

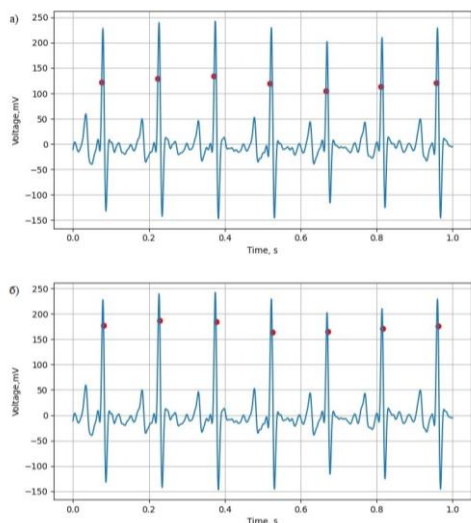


Рис. 1. Результаты работы алгоритмов выделения R-зубцов: а) гардиентного; б) основанного на преобразовании

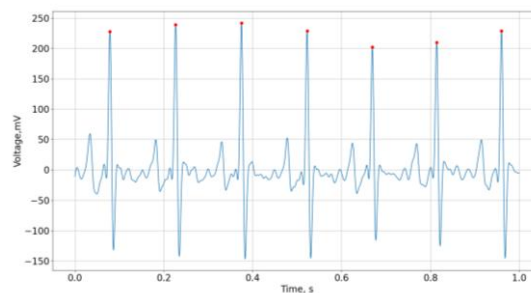


Рис. 2. Результат ручного выделения R-зубцов

изменения СКО ВЧ-сигнала в каждом выделенном кардиоцикле НЧ-сигнала позволяет грубо выявить признаки начала острой ишемии во время ее моделирования у крысы (Рис.3, а). Предварительные исследования по изменениям спектральной плотности мощности ВЧ-сигналов без выделения кардиоциклов дают менее наглядный результат (Рис.3, б).

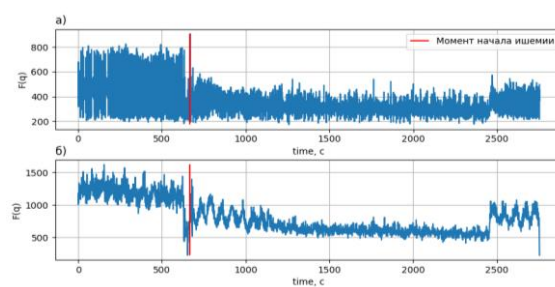


Рис. 3. Изменение СКО спектральной плотности мощности при разделении ЭКС на кардиоциклы (а) и на временные интервалы (б)

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ по выбранным алгоритмам выделения R-зубцов кардиоциклов показал, что в данной работе наилучшими характеристиками обладает алгоритм, основанный на преобразовании Гильберта. Данное исследование не исчерпывающее, однако дает возможность более точно проводить последующее исследование ВЧ-составляющих ЭКС СВР. Выделение кардиоциклов позволило более точно сопоставить изменения спектральной плотности мощности с моментом начала развития острой ишемии у подопытной крысы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зайченко, К.В. Медицинские аспекты применения радиолокационных методов обработки сигналов при реализации электрокардиографии сверхвысокого разрешения / К.В. Зайченко, А.А. Кордюкова, Е.П. Логачев, М.Н. Лучкова // Медицинская техника. – 2021. – Т. 1, № 325. – С. 21-24.
- [2] Haijiang, D. Global, regional, and national burden of ischaemic heart disease and its attributable risk factors, 1990–2017: results from the Global Burden of Disease Study 2017 / D. Haijiang et. al. // European Heart Journal - Quality of Care and Clinical Outcomes. – 2022. – Vol. 8(1). – P. 50–60.
- [3] Зайченко, К.В. Методика электрокардиографических исследований при проведении экспериментов по созданию искусственной ишемии у подопытных животных / К.В. Зайченко, Б.С. Гуревич, А.А. Жмылева, А.А. Князев, Е.П. Логачев // Медицинская техника. – 2019. – Т. 4. – С. 17-20.
- [4] Рослякова, А.В. Сравнительный анализ алгоритмов обнаружения R-зубца электрокардиосигнала / А.В. Рослякова, П.Г. Чурпаков Вятский медицинский вестник. – 2012. – Т. 2. – С. 29–35.
- [5] Соколова, А.А. Методы и алгоритмы обработки электрокардиосигнала для выявления эпизодов желудочковых экстрасистол / А.А. Соколова – Дисс. – Санкт-Петербург, 2018.