

АЛГОРИТМЫ ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОКАРДИОДИАГНОСТИКИ В УСЛОВИЯХ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ

¹Кривоногов Л.Ю., ¹Иванчуков А.Г.

¹ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», Пенза, Россия (440026, г. Пенза, ул. Красная, 40),
e-mail: anton@dezigner.ru

Настоящая статья посвящена разработке алгоритмов помехоустойчивой обработки электрокардиосигналов в условиях двигательной активности человека. Разработана система электрокардиодиагностики критических состояний в условиях двигательной активности. Выявлены проблемы подавления помех в подобных системах. Показаны некоторые пути решения этих проблем: применение нелинейных фильтров, уточнение моделей помех, использование робастных процедур, формирование оценки помехи. Особое внимание уделено процедурам обработки сигналов на основе порядковых статистик. С учетом проведенных исследований разработаны два адаптивных алгоритма подавления помех в электрокардиосигналах в условиях двигательной активности. Первый алгоритм предназначен для работы в условиях параметрической неопределенности сигнально-помеховой обстановки. Второй алгоритм – для условий непараметрической неопределенности сигнально-помеховой обстановки. В заключение приведены сведения о реализации и эффективности разработанных фильтров.

Ключевые слова: электрокардиосигнал, система электрокардиодиагностики, двигательная активность, ранговый фильтр, обработка сигнала

ALGORITHMS INTERFERENCE SUPPRESSION FOR ECS SYSTEMS IN THE MOTION ACTIVITY

¹Krivosnogov L.Y., ¹Ivanchukov A.G.

¹Penza State University, Penza, Russia (440026 Penza, Krasnaya st. 40), e-mail: anton@dezigner.ru

This article is dedicated to development of algorithms for interference-free EKG processing in the conditions of human motion activity. Developed a system EKG diagnostic of critical states in conditions of motion activity. The problems of interference suppression in these systems. Showing some solutions to these problems: the use of nonlinear filters, accurate models of interference, the use of robust procedures, formation of interference estimate. Special attention is given to the procedures of signal processing based on the order statistics. Given the research developed two adaptive interference suppression EKG methods in conditions of motion activity. The first algorithm is designed to work under parametric uncertainty signal-interfering situation. The second algorithm – for the conditions of nonparametric uncertainty signal-interfering situation. In conclusion, presents data on implementation and effectiveness of the developed filters.

Keywords: EKG, EKG-system, motor activity, rank filter, signal processing

На сегодняшний день особое значение для диагностики заболеваний сердечно-сосудистой системы имеет длительный автоматический анализ электрокардиосигналов (ЭКС) в реальных жизненных условиях. При этом появляется возможность выявить критические состояния, которые возникают при физических и эмоциональных нагрузках, стрессах, зачастую в условиях профессиональной деятельности, и обычно не диагностируются при кратковременном ЭКГ-исследовании в состоянии покоя.

Глобальное распространение мобильной связи, развитие Интернета и возможности современных смартфонов позволяют создавать системы электрокардиодиагностики (СЭКД) нового поколения, обеспечивающие выявление критических состояний в реальном времени и условиях двигательной активности пациентов.

Структурная схема разработанной СЭКД приведена на рисунке 1. Портативный регистратор ЭКС, закрепленный на торсе пациента, осуществляет регистрацию, первичную обработку и беспроводную передачу ЭКС на смартфон. На экране смартфона отображаются графическая информация, а также результаты измерений и анализа. Кроме того, модуль позиционирования через навигационные спутники определяет координаты местоположения пациента, которые передаются через Интернет на сервер приложений. Система обеспечивает экспресс-оценку состояния сердца и вызов скорой помощи к местонахождению пациента в случае критического состояния [2].

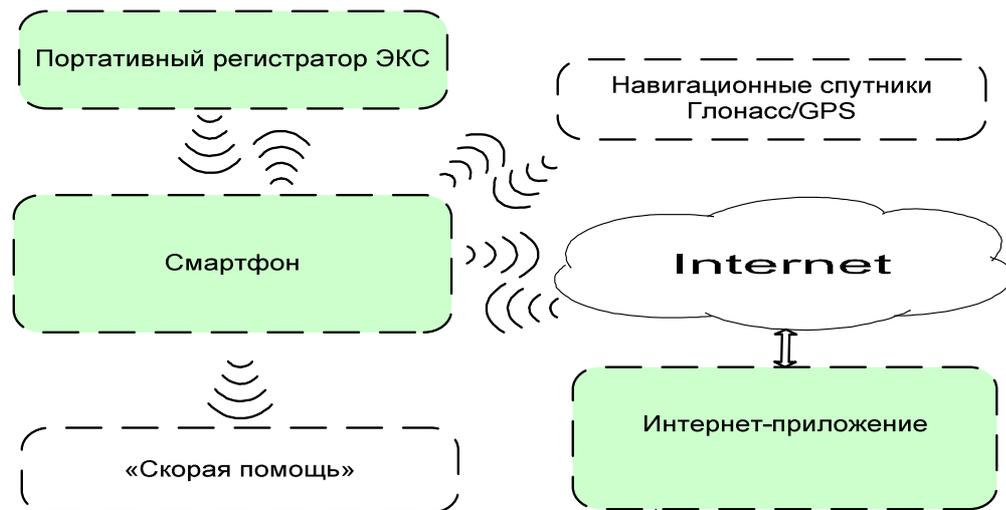


Рис. 1. Структура СЭКД критических состояний в условиях двигательной активности

Одним из важнейших требований к системам электрокардиодиагностики, работающим в условиях двигательной активности, является обеспечение приемлемого качества электрокардиосигналов для их автоматической интерпретации. Извлечение диагностической информации из ЭКС представляет собой серьезную научную проблему, что связано с особенностями ее происхождения, преобразования (на пути от сердца до регистратора) и регистрации. ЭКС представляют собой нестационарные структурированные сигналы с повторяющимися информативными участками. Именно по признакам, сосредоточенным на этих участках, в электрокардиографии оценивается состояние сердца. Форма и параметры информативных участков ЭКС разнообразны, изменчивы и не всегда предсказуемы. Кроме того, при регистрации ЭКС неизбежно присутствуют помехи различного вида и происхождения, которые проявляются особенно сильно в условиях длительной регистрации и двигательной активности пациентов.

Принципиальной особенностью разработки систем электрокардиодиагностики является тот факт, что при регистрации и обработке ЭКС нет полного объема априорных сведений о свойствах сигналов и помех, т.е. имеет место априорная неопределенность

сигнально-помеховой обстановки (СПО). Такая неопределенность обусловлена нестационарным поведением полезного сигнала и помех.

Обработка ЭКС в мобильных устройствах накладывает свои ограничения на применяемые алгоритмы. Это связано в первую очередь с производительностью процессоров ARM-архитектуры, применяющихся в большинстве современных мобильных устройств. ARM-процессоры, которые имеют низкое энергопотребление, что и привело к их популярности на рынке мобильных устройств, предполагают более низкое быстродействие выполнения операций по сравнению с процессорами, применяемыми в настольных ПК. Следовательно, алгоритмы, применяемые для обработки ЭКС в мобильных устройствах, должны обладать невысокой сложностью, обеспечивающей работу ARM-процессора в реальном времени.

Традиционно помехи в электрокардиографии делят на следующие виды: высокочастотный шум электродов и усилителей; помехи, вызванные активностью отдельных мышц; наводки промышленной сети; помехи движения, связанные с деформацией кожи и изменением кожного потенциала; дрейф изолинии – низкочастотные помехи, связанные с поляризацией электродов, влиянием дыхания, изменением кожно-электродных потенциалов и межэлектродного импеданса. Несколько видов помех могут наблюдаться одновременно и независимо исказить ЭКС. Результирующая помеха в общем случае имеет случайный, априорно неизвестный спектр частот, перекрывающийся со спектром полезного сигнала, поэтому ее устранение без искажения полезного сигнала представляет серьезную проблему.

Рассмотрим некоторые пути решения этой проблемы.

В работах [1, 7, 9] показана перспективность применения нелинейных фильтров для помехоустойчивой обработки ЭКС. Кроме того, в последние годы появляются работы, посвященные уточнению моделей помех, использованию для этого негауссовских распределений, разработке методов устранения аномальных отсчетов и импульсных помех [5].

Одним из требований к выбору алгоритмов подавления помех в ЭКС является использование робастных процедур, способных обеспечивать приемлемое качество обработки в условиях изменчивости сигнально/помеховой обстановки, нестационарности характеристик информационной составляющей и помех, а также в случаях отклонений принятых допущений о модели изменения сигнала и помех от реальной ситуации [8].

Особый интерес для обработки ЭКС представляют нелинейные процедуры на основе порядковых статистик (ранговые фильтры). Процедура ранжирования входных отсчетов сигнала преобразует их в последовательность целых чисел – рангов, зависящих от относительного уровня данного отсчета среди всей наблюдаемой совокупности. Ранги

обладают многими полезными для практического применения свойствами, а теория ранговых процедур развита наиболее глубоко по сравнению с непараметрическими методами других классов и в наилучшей степени подготовлена для практического внедрения [4]. Формально процедуру вычисления ранга можно представить в виде:

$$R_i = \sum_{k=1}^n h(x_i - x_k), \quad (1)$$

где h – функция единичного скачка.

Наиболее известной ранговой процедурой является алгоритм медианной фильтрации, предложенный Дж. Тьюки для подавления импульсных помех, сглаживания сигналов, выделения низкочастотных помех. Кроме классического медианного, в классе ранговых фильтров известны также взвешенные медианные фильтры [6], экстремальные фильтры, фильтры на основе L-оценок (α -урезанное среднее, трехэлементное среднее); фильтры Вилкоксона и Ходжеса—Лемана [5]; КИХ гибридные фильтры [10], SD ROM фильтры. И хотя все эти алгоритмы основаны на ранжировании, не все из них являются робастными.

Хотя ЭКС и обладает некоторой характерной структурой, модель полезного сигнала обычно неизвестна, поэтому при создании алгоритмов подавления помех мало подходят методы, основанные на поиске сходства с опорным (модельным) сигналом. В этой ситуации целесообразно строить алгоритм таким образом, чтобы получить информацию о свойствах помехи, а затем использовать эту информацию для создания процедур, обеспечивающих эффективное подавление помех. Следовательно, необходимым условием преодоления априорной неопределенности СПО является формирование оценки помехи или обучающей (опорной) помеховой выборки. Оценка помехи может быть использована для выбора соответствующего фильтра и/или для изменения его настроечного параметра, а также для определения порогов обнаружения элементов ЭКС.

Наиболее информативна и удобна для формирования оценка помехи в отсутствие полезного сигнала. Структура ЭКС и современные алгоритмы обработки сигналов в большинстве случаев позволяют разделить сигнал на информативные и неинформативные временные участки даже при наличии интенсивных помех. Выделение неинформативного участка ЭКС, на котором присутствует только помеха, позволяет сформировать оценку помехи в отсутствие полезного сигнала и использовать эту оценку для повышения эффективности помехоподавления.

Особое место во временной обработке ЭКС занимают процедуры сегментации – разделение сигнала на временные участки с близкими свойствами, обнаружение и выделение информативных или, наоборот, неинформативных участков. Именно сегментация дает предпосылки формирования оценки помехи в отсутствие полезного сигнала. Основой

сегментации являются процедуры обнаружения информативных участков (ИУ) ЭКС на фоне помех. Эта процедура имеет ключевое значение для работы алгоритмов анализа ЭКС в целом. Пример сегментации участка ЭКС показан на рисунке 2.

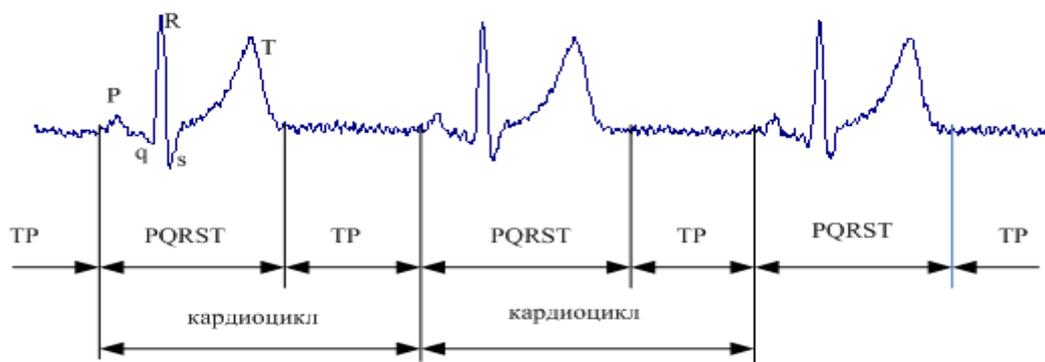


Рис. 2. Результат сегментации участка ЭКС

С учетом вышеизложенного, для подавления помех в ЭКС разработан адаптивный фильтр, структурная схема которого изображена на рисунке 3. Для подавления высокочастотных и импульсных помех предлагается использовать ранговый фильтр. Для оценки закона распределения текущей помехи и выбора значения параметра настройки фильтра введены ранговый обнаружитель ИУ ЭКС и формирователь оценки помехи. Ранговый обнаружитель ИУ ЭКС позволяет разделить ЭКС на информативные (*PQRST*-комплексы) и неинформативные участки (*TP*-сегменты). Предполагается, что на *TP*-сегменте присутствует лишь помеха, и при этом появляется возможность сформировать некоторые оценки ее параметров (интенсивности, закона распределения и т.д.). Сформированная таким способом оценка может быть использована для управления ранговым фильтром.

Формирователь опорных точек позволяет выделить как минимум одну точку на *TP*-сегменте. По этим опорным точкам реконструируется (оценивается) дрейф изолинии (Узел реконструкции ДИ), который вычитается из сигнала с выхода рангового фильтра (с соответствующей задержкой).

Для подавления высокочастотных помех в ЭКС целесообразно применять робастные ранговые процедуры с настроечным параметром, адаптирующиеся к распределению помех и степени гладкости сигнала (обеспечивающие большее сглаживание на неинформативных участках сигнала и меньшее — на информативных).

Еще одним доводом для применения ранговых процедур является эффективность их использования для обнаружения информативных участков ЭКС (*QRS*-комплексов). При длительном анализе ЭКС в условиях двигательной активности меняются свойства полезного сигнала и помех. Одним из направлений решения задачи обнаружения сигналов в таких

условиях являются методы непараметрической статистики, которые применяют, когда заданы самые общие отличия между ситуациями наличия и отсутствия сигнала. В работе [3] разработан ряд ранговых алгоритмов обнаружения *QRS*-комплексов ЭКС, в том числе и отвечающих требованиям применения в мобильных устройствах.

Ранговые процедуры достаточно просто реализуются современными цифровыми устройствами, так как ранги являются дискретными величинами, принимающими целочисленные значения. Поэтому для их вычисления требуются простейшие операции типа сравнения и суммирования. Кроме того, в последние годы разработаны быстрые алгоритмы ранжирования.

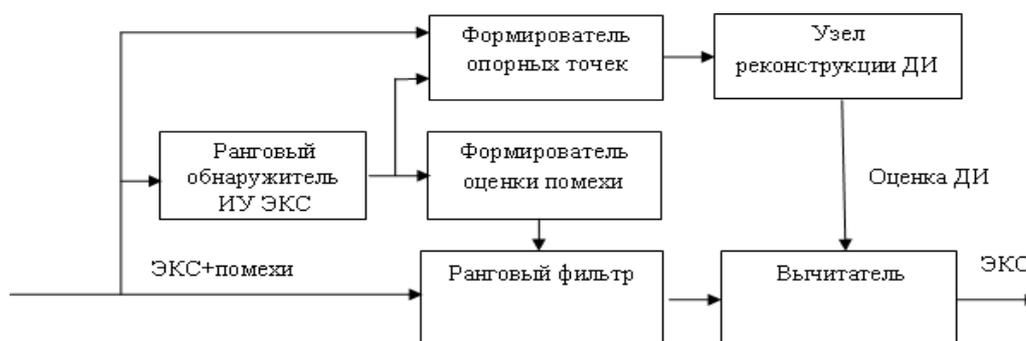


Рис. 3. Структурная схема адаптивного фильтра для подавления помех в ЭКС при параметрической неопределенности СПО

Разработанный фильтр (рис. 3) обеспечивает эффективное подавление помех лишь при параметрической неопределенности СПО (в ситуации, когда априори не известны значения конечного числа параметров помех, при известном законе их распределения). Для подавления помех в условиях непараметрической неопределенности (когда не известен закон распределения помех) разработана структурная схема, приведенная на рисунке 4. Схема отличается наличием нескольких фильтров, каждый из которых обеспечивает эффективное подавление помех на конкретных локальных участках ЭКС в соответствии с СПО на них.



Рис. 4. Структурная схема адаптивного фильтра для подавления помех в ЭКС при непараметрической неопределенности СПО

Разработанные фильтры реализованы в виде виртуальных приборов системы графического программирования LabVIEW. В настоящее время виртуальные приборы проходят тестирование на сигналах базы электрокардиографических данных. Предварительные результаты исследований позволяют сделать выводы о повышении эффективности подавления помех в ЭКС разработанными фильтрами на 10–12%.

Список литературы

1. Абрамов С.К., Кортунов В.И., Лукин В.В. Нелинейная фильтрация сигналов. Учеб. Пособие. – Харьков. Нац. аэрокосм. Ун-т, 2007;
2. Бодин О.Н., Иванчуков А.Г., Полосин В.Г., Петровский М.А. Концепция диагностики состояния сердца в условиях свободной двигательной активности // Современные проблемы науки и образования. 2014. — № 6;
3. Кривоногов Л.Ю. Методы и алгоритмы помехоустойчивой обработки электрокардиографической информации: Дис. ... кан. техн. наук: 05.13.01. Пенза, 2003, 228 с.
4. Лапий В. Ю., Калюжный А. Я., Красный Л. Г. Устройства ранговой обработки информации – К.: Техніка, 1986;
5. Роечко А.А., Лукин В.В., Зеленский А.А. Определение параметра сдвига выборки данных с симметричным негауссовым распределением на основе использования методов адаптивного робастного оценивания. // Радіоелектронні і комп'ютені системи. 2005. № 2. С. 78–88;
6. Сорокин С.В. Использование взвешенных медианных фильтров для удаления импульсного шума при обработке изображений. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2007. — № 3 (30). — С. 50–57;
7. Тулякова Н.О. Исследование эффективности локально-адаптивных алгоритмов нелинейной фильтрации для обработки электрокардиограмм // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. 2003. — № 11 (57). С. 134–144;
8. Хьюбер Дж.П. Робастность в статистике. – М.: Мир, 1984;
9. Clifford G. D., Azuaje F, McSharr P. E. Advanced Methods and Tools for ECG Data Analysis. Artech House, Inc. 2006;

10. Wichman R., Astola J., Heinonen P., Neuvo Y. FIR-Median Hybrid Filter with Excellent Transient Response in Noisy Conditions / IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. 1990. Vol. 38, № 12. Pp. 2108–2116;

Рецензенты:

Чувыкин Б.В., д.т.н., профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы», ПГУ, г. Пенза;

Трофимов А.А., д.т.н., профессор, заместитель начальника учебно-научного центра ОАО «НИИФИ», г. Пенза.