

ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММ

Б.А. ОГАНИСЯН, Т.Н. ОГАНЕСЯН, А.О. МАКАРЯН*

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: armenm@ysu.am

(Поступила в редакцию 27 марта 2020 г.)

В настоящей работе предложена и выполнена статистическая обработка электрокардиограммы (спектральный и биспектральный анализ) с использованием метода «скользящего окна». Была разработана система записи и оцифровки электрокардиограммы, выходной сигнал которой подается на компьютер. Обработка сигнала осуществляется с помощью системы, выполненной в среде LabVIEW. Показано, что частотно-временной анализ с использованием метода «скользящего окна» позволяет обнаруживать динамические процессы в работе сердца человека, которые могут оставаться незамеченными при стандартных анализах. Результаты исследований могут быть полезны для диагностики заболеваний сердца.

1. Введение

Современная функциональная диагностика здоровья человека располагает самыми различными инструментальными методами исследования, некоторые из которых доступны только узкому кругу специалистов. Одним из самых распространенных и доступных методов исследований является электрография – регистрация биопотенциалов тканей и органов. Однако, более распространены конкретные названия соответствующих диагностических методов: электрокардиография (ЭКГ) – регистрация биопотенциалов, возникающих в сердечной мышце при ее возбуждении, электромиография (ЭМГ) – регистрация биоэлектрической активности мышц, электроэнцефалография (ЭЭГ) – регистрация биоэлектрической активности головного мозга и др. Снятие биопотенциалов непосредственно с органа – сердца, головного мозга и др. (инвазивный метод) в большинстве случаев связано с большими трудностями поэтому часто биопотенциалы снимаются электродами с других, соседних наружных тканей, на которых исследуемым органом наводятся электрические потенциалы (неинвазивный метод).

Основным методом исследования динамики развития сердечно-сосудистых заболеваний является электрокардиография [1,2], так как она является

неинвазивным методом и не причиняет особое беспокойство пациенту. Прямым результатом электрокардиографии является получение электрокардиограммы (ЭКГ сигнала) – графического представления разности потенциалов возникающих в результате работы сердца. На ЭКГ сигнал отражаются все действующие потенциалы, возникающие во время работы сердца.

После первых работ О. Уоллера [3,4] и В. Эйнтховена [4] еще в конце 19-го века по регистрации электрокардиосигнала, методика регистрации ЭКГ сигнала интенсивно совершенствовалась и, несмотря на более чем 100-летнюю историю применения в клинической практике, электрокардиография до сих пор остается востребованным методом диагностики сердечно-сосудистых заболеваний.

Одним из важных моментов этапа сбора данных о состоянии здоровья сердца является снятие и анализ электрокардиограммы [1,2,4]. Существует большая гамма приборов для регистрации ЭКГ сигнала. Часть из них способна также анализировать зарегистрированный сигнал ЭКГ. Следует отметить, что особенно эффективное использование медицинской аппаратуры на современном этапе стало возможно благодаря появлению быстродействующих микропроцессоров, поскольку приборы на их основе способны производить сложную математическую обработку данных и представить большой объем информации различной степени сложности в ясной и доступной для медицинского персонала форме, что является важным условием для быстрого принятия необходимых решений.

Используемые рабочие методы обработки и анализа электрокардиографической информации [5–10], несмотря на их исключительное разнообразие, не обеспечивают полного решения задачи [10]; более того, результаты, полученные различными методами, зачастую противоречат друг другу. Поэтому, для наиболее точного оценивания состояния сердца естественно искать альтернативные методы статистической обработки ЭКГ сигналов.

В последнее время наряду со спектральным анализом ЭКГ сигнала широко применяется также биспектральный анализ – двумерное преобразование Фурье корреляционных функций третьего порядка [5–7,11–13]. Обработка сигналов с использованием биспектрального анализа позволяет узнать о свойствах сигнала гораздо больше, чем применение энергетического спектра [7,12,13]. При биспектральном анализе сохраняется информация о фазовом спектре исходного сигнала и, следовательно, появляется возможность восстановления априорно неизвестной формы сигнала. Кроме того, биспектр мало чувствителен к аддитивной помехе с симметричным законом распределения плотности вероятности, а также к случайным смещениям обрабатываемого сигнала. Биспектр в отличие от энергетического спектра позволяет не только правильно описать характеристики наблюдаемого процесса, но и определить наличие фазовых связей спектральных

компонент, а также сохранить, а при необходимости и восстановить фазовые характеристики составляющей, содержащейся в наблюдаемом процессе.

Несмотря на вышесказанное, при обработке ЭКГ сигнала при его длительном наблюдении часто теряется информация о динамике процесса, которая могла бы способствовать для быстрой и точной диагностики состояния сердца. Поэтому, для выявления динамических особенностей в поведении сердца, в настоящей работе предложен и проведен частотно-временной анализ ЭКГ сигнала с применением кратковременного преобразования Фурье и биспектрального анализа.

2. Материалы и методы исследования

Для проведения частотно-временного анализа нами была собрана ЭКГ установка, блок схема которого изображена на Рис.1.

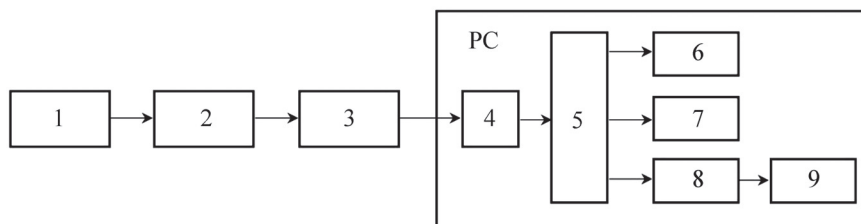


Рис.1. Блок схема ЭКГ установки: 1 – датчики (электроды), 2 – предварительный малошумящий усилитель, 3 – аналого-цифровой преобразователь, PC – компьютер, 4 – блок предварительной обработки сигнала, 5 – блок разделения сигнала на сегменты, 6 – анализатор спектра, 7 – биспектральный анализатор, 8 – измеритель ритма сердца, 9 – анализатор спектра ритма сердца.

В качестве датчиков 1 электрокардиосигналов нами использовались стандартные электроды для ЭКГ.

Сигнал, полученный от электродов усиливается с помощью малошумящего дифференциального усилителя 2 с коэффициентом усиления ~ 100 , и подается на вход аналого-цифрового преобразователя 3. Оцифрованный сигнал вводится в компьютер для последующей обработки. Обработка сигнала была произведена в среде LabVIEW.

С помощью блока предварительной обработки 4 снимается постоянная составляющая сигнала, после чего в блоке 5 выбирается нужная часть кардиосигнала определенной длительности для численного анализа. Выбранная часть сигнала параллельно обрабатывается анализатором спектра 6, биспектральным анализатором 7. Измеряется также ритм биений сердца с помощью блока 8 и снимается спектр ритма анализатором 9. Описанная схема статистической обработки позволяет обрабатывать данные ЭКГ, накопленные за любой промежуток

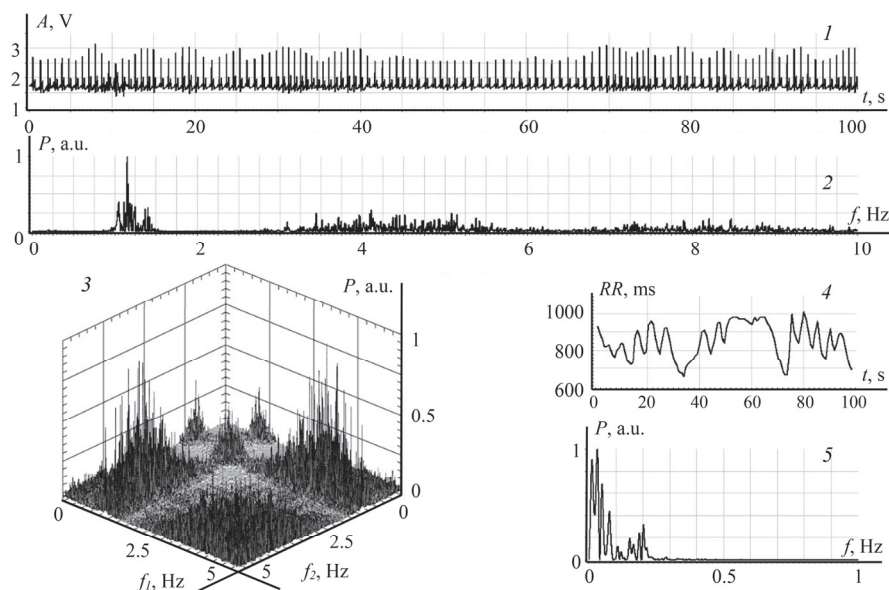


Рис.2. 1 – ЭКГ лежащего человека, записанный за 100 сек., 2 – энергетический спектр ЭКГ, 3 – биспектр ЭКГ, 4 – изменение ритма биения сердца, 5 – спектр изменения ритма.

времени- начиная от одного периода биения сердца до несколько часов. На Рис.2 приведены ЭКГ лежащего человека за 100 сек., его энергетический спектр, биспектр, изменение ритма биения сердца и спектр изменения ритма.

Из Рис.2. видно, что за период наблюдения происходит значительное изменение ритма биения сердца, однако, это практически не отражается на энергетическом спектре и на биспектре, т. к. при такой (длительной) обработке получаются усредненные значения спектра и биспектра, и теряется информация о динамике изменения параметров ЭКГ.

Для восстановления динамической картины, нами был использован метод скользящего окна (sliding window method) [14, 15]. Формируется временной интервал (окно) определенной длительности (в данном случае $\Delta T = 10$ сек.), и обрабатывается весь набор значений кардиосигнала в этом интервале. После обработки данного набора окно смещается по временной последовательности на один шаг ($\Delta t = 100$ мсек.) и обрабатывается новый набор значений кардиосигнала. Этот процесс повторяется до тех пор, пока скользящее окно не дойдет до конца наблюдаемого временного интервала (в нашем случае $T = 100$ сек.). При указанном выборе длительности скользящего окна ($\Delta T \gg 1/f$, где f – это частота биения сердца) в спектре ЭКГ отчетливо выделяются основная частота, гармоники и другие спектральные компоненты.

Результаты спектрального анализа ЭКГ сигнала с использованием метода скользящего окна можно представить в виде частотно-временной диаграммы (изменение спектра ЭКГ во времени).

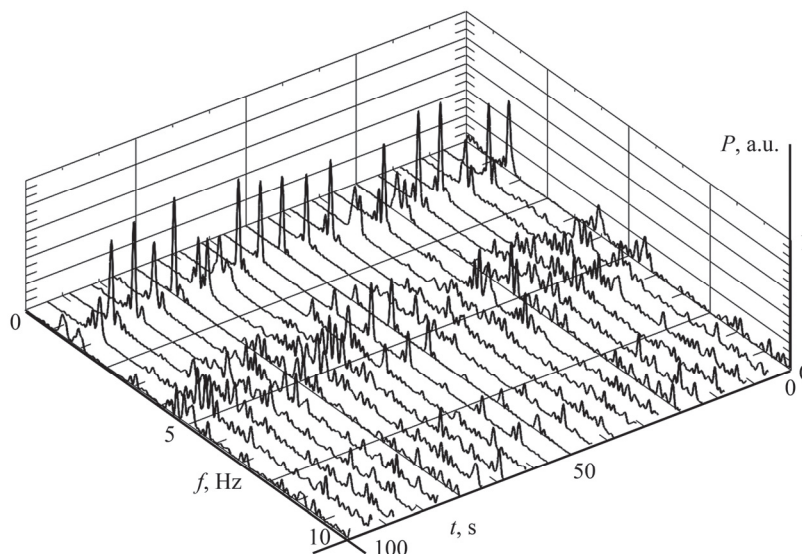


Рис.3. Частотно-временная диаграмма ЭКГ.

3. Результаты исследований, обсуждение и выводы

На Рис.3. представлена частотно-временная диаграмма, соответствующая ЭКГ сигнала, изображенного на Рис.2.

На Рис. 3. отчетливо видно, что сердцебиение лежащего человека не происходит монотонно. Выделяются основная частота биения сердца и ее гармоники. Однако энергетический спектр ЭКГ вокруг основной частоты периодически меняется (в частности, при $t \approx 30$ сек. и при $t \approx 65$ сек.), и наблюдаются два, а временами три или даже четыре горба. Соответственно сильно меняется спектр вокруг гармоник основной частоты, а также биспектр ЭКГ.

На Рис.4 представлены ЭКГ и результаты обработки кардиосигнала в интервале скользящего окна ($\Delta T=10$ сек.) в разные моменты времени.

Анализ ЭКГ сигнала с использованием метода скользящего окна четко выявляет кратковременные изменения характера биения сердца. Так, например, в течение времени от 45 до 60 сек. сердцебиение относительно ровное (см. на ЭКГ и на ритм сердца на Рис.2), и на энергетическом спектре ЭКГ четко выделяются его основная частота, третья и четвертая гармоники (Рис.4а). В тех отрезках времени, где ритм сердца меняется заметно, основная частота биения в спектре ЭКГ раздваивается – появляются две отчетливо выделенные частоты (Рис.4б). Сильно меняется также спектр вокруг гармоник основной частоты. Во время работы сердца могут заметно меняться как ритм биений, так и амплитуда кардиосигнала (см. Рис.2). Однако, как видно на частотно-временной диаграмме (Рис.3.), на форму спектра вокруг основной частоты в основном влияет характер

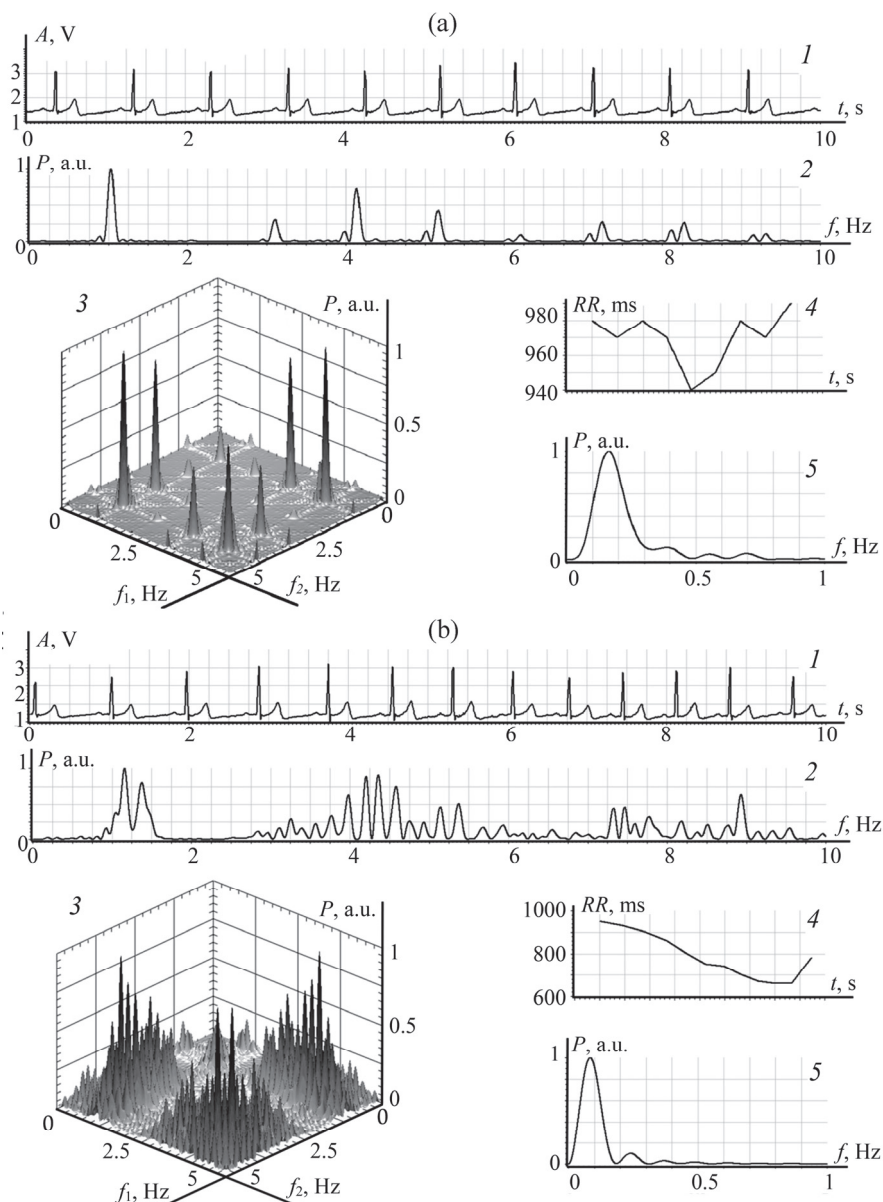


Рис.4. 1 – ЭКГ, 2 – энергетический спектр ЭКГ, 3 – биспектр ЭКГ, 4 – ритм сердца, 5 – спектр ритма: (а) при $t = 55$ сек., (б) при $t = 66$ сек.

изменения ритма биений сердца, а изменение амплитуды ЭКГ заметно влияет на форму спектра только в области гармоник основной частоты.

Отметим, что кроме ЭКГ, представленной на Рис.2, нами было исследовано еще множество различных кардиограмм. Результаты этих исследований указывают на то, что статистический анализ ЭКГ сигнала с использованием метода скользящего окна может выявлять такие характерные особенности работы сердца, которые не заметны при анализе кардиосигнала стандартными методами.

Мы предполагаем, что исследование кардиограмм пациентов с различными патологиями сердца с использованием метода скользящего окна поможет найти корреляцию между патологией и результатами анализов, которая в свою очередь может способствовать выявлению патологии при установлении диагноза.

ЛИТЕРАТУРА

1. **R. McCraty.** Exploring the Role of the Heart in Human Performance, Volume 2, HeartMath Research Center, 2015, p.118.
2. **А.А. Кузнецов.** Биофизика Сердца, Владимир, изд ВлГУ, 2012, с.237.
3. **A.D. Waller.** The Journal of physiology, 8(5), 229 (1887).
4. **G.E. Burch, N.P. DePasquale.** A history of electrocardiography, Norman Publishing, 1990.
5. **S.K. Berkaya et al.** Biomedical Signal Processing and Control, **43**, 216 (2018).
6. **L. Sornmo, P. Laguna.** Electrocardiogram (ECG) Signal Processing, Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering, 2006.
7. **C.K. Chua, V. Chandran, R. Acharya, L.C. Min.** Medical Engineering and Physics, **32**(7), 679 (2010).
8. **J. Wang, P. Wang, S. Wang,** Biomedical Signal Processing and Control, **55**, 1 (2020).
9. **D.N. Ghista et al.** Journal of Medical Systems, **34**, 445 (2010).
10. **J. Moeyersons, E. Smets, J. Morales, et al.** Computer Methods and Programs in Biomedicine, **182**, 105050 (2019).
11. **R.S.H. Istepanian, L.J. Hadjileontiadis, S.M. Panas.** IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, **5**(2), 108 (2001).
12. **А.А. Зеленский, В.Ф. Кравченко, В.В. Павликов, А.В. Тоцкий.** Физические основы приборостроения, **2**(3), 4 (2013).
13. **A.P. Petropulu.** Higher-Order Spectral Analysis, CRC Press LLC, 2000.
14. **J.H. Chang, W.S. Lee.** Journal of Information Science, **31**, 76 (2005).
15. **А.В. Тоцкий.** Системы обработки информации, **3**, 108 (2009).

FREQUENCY-TEMPORAL ANALYSIS OF ELECTROCARDIOGRAMS

B.A. HOVHANNISYAN, T.N. HOVHANNESYAN, A.H. MAKARYAN

Statistical processing of electrocardiogram (spectral and bispectral analysis) using the "sliding window" method was proposed and performed in this work. An electrocardiogram recording and digitizing hardware system has been developed. The output data of this hardware is fed to the computer. Signal processing is done using a system executed in the LabVIEW environment. It is shown that frequency-temporal analyzes using the "sliding window" method allow the detection of dynamic processes in the workings of the human heart that may be unnoticed in standard analyzes. The results of these studies may be useful in the diagnosis of heart disease.