

А.В. ИВАШКО, канд. техн. наук, профф. НТУ «ХПИ»

Д.А. ЛУНИН, ст. преп., НТУ «ХПИ»

А.А. ПОДЛОЗНАЯ, студент НТУ «ХПИ»

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ СПЕКТРАЛЬНО-КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ КАРДИОСИГНАЛОВ

В статье рассмотрены алгоритмы цифрового спектрального анализа основанные на преобразовании Фурье. Проведен сравнительный анализ методов спектрального анализа цифровых сигналов. На основе эксперимента сделаны предложения, относительно выбора оптимального метода цифрового анализа.

Ключевые слова: спектр, спектральный анализ, ритмограмма, электрокардиограмма, вариабельность сердечного ритма, алгоритм, цифровой сигнал.

Введение. В настоящее время большинство людей страдают различными патологиями сердца, поэтому остро стоит вопрос о необходимости диагностики сердечнососудистой системы. При оценке состояния сердца и сердечнососудистой системы человека ключевую роль играет анализ электрокардиограммы (ЭКГ).

Образное представление ритмической структуры ЭКГ является особенно актуальным из-за большого объема обрабатываемой информации, который трудно полностью охватить. Для визуального представления последовательности R-R интервалов применяется ритмограммы, представляющие собой график ряда межсистолических интервалов в виде отрезков прямой линии, эквивалентных по длине продолжительности пауз между сокращениями сердца.

Также, актуальной задачей для диагностики, прогнозирования, лечения и предупреждения болезней, является вариабельность сердечного ритма (BCP), которое с большой точностью отражает состояние регуляторных процессов в нашем организме.

При спектральном анализе ритмограмм принято определять следующие параметры: высокочастотные колебания (ВЧ или HF), низкочастотные колебания (НЧ или LF), а также их комбинация (LF/ HF).

Анализ основных достижений и литературы. Разработано большое количество алгоритмов спектрального анализа цифрового сигнала:

- периодограммный метод, как оценка спектральной плотности мощности, основанная на вычислении квадрата модуля преобразования Фурье последовательности данных с использованием статистического усреднения;
- метод Уэлча, как усовершенствованный периодограммный;
- коррелограммный метод, основанный на теореме Винера-Хинчина;
- метод Юла-Уолкера, основанный на решении тёплицевых уравнений;
- метод Берга, как оценка коэффициентов отражения;

© А. В. Ивашко, Д. А. Лунин, А. А. Подлозная, 2013

- ковариационный метод, который вычисляет решения наименьших квадратов для ковариационных нормальных уравнений;
- модифицированный ковариационный метод, как усовершенствованный ковариационный.

Все они отличаются лишь условиями, которыми необходимо ограничиться при нахождении коэффициентов.

Для периодограммного метода Уэлча характерно усреднение спектральной плотности мощности по ряду перекрывающихся сегментов:

$${}^k X(j\omega) = \sum_{i=0}^{D-1} {}^k x_i \cdot e^{-j\omega i} . \quad (1)$$

При этом увеличение числа сегментов повышает помехоустойчивость алгоритма, но уменьшает разрешающую способность.

Коррелограммный метод, основанный на теореме Винера-Хинчина:

$$S(\omega) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} R(i) e^{-j\omega i} \quad (2)$$

где $S(\omega)$ – спектральная плотность мощности; $R(i)$ – i -й отсчет автокорреляционной функции анализируемого сигнала.

Увеличение числа отсчетов АКФ L повышает разрешение, уменьшение L повышает степень сглаживания шума. Очевидно, что с уменьшением L степень сглаживания увеличивается, а разрешение ухудшается.

Наиболее точные спектральные оценки дает группа методов, основанных на параметрическом моделировании. Суть этих методов состоит в том, что сигнал представляется как результат прохождения белого шума ε_i с нулевым средним, дисперсией D_ε и средним квадратическим отклонением σ_ε через цифровой фильтр. Возможны различные методы нахождения коэффициентов фильтра.

Нормальные уравнения Юла-Уолкера для АР-модели.

$$\begin{bmatrix} R(0) & R(-1) & \dots & R(-M) \\ R(1) & R(0) & \dots & R(-M+1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R(M-1) & R(M-2) & \dots & R(1) \\ R(M) & R(M-1) & \dots & R(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -b_1 \\ \dots \\ -b_{M-1} \\ -b_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_\varepsilon \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Получив из них коэффициенты фильтра b_1, b_2, \dots, b_M и дисперсию шума D_ε , можно рассчитать спектральную плотность мощности $S(\omega)$:

$$S(\omega) = \frac{D_\varepsilon}{\left(1 - \sum_{k=1}^M b_k \cos(\omega k)\right)^2 + \left(\sum_{k=1}^M b_k \sin(\omega k)\right)^2}, \quad (4)$$

а также амплитудный спектр $X(\omega) = \sqrt{S(\omega)}$.

Особенностью уравнений Юла-Уолкера для любой модели сигнала является то, что матрицы коэффициентов систем линейных уравнений имеют специальный вид – в них все элементы, расположенные на любой диагонали идентичны, то есть $a_{i,j} = a_{i+k,j+k}$. Такие матрицы называются *тёплицевы*, а для решения систем с тёплицевыми матрицами коэффициентов разработаны целый ряд методов – алгоритмы *Левинсона*, *Тренча*, *Дурбина*. Применение таких алгоритмов позволяет значительно сократить число операций и объем памяти при решении систем линейных уравнений и, таким образом, упростить процесс нахождения коэффициентов модели и спектральных оценок.

Недостатком метода Юла-Уолкера является слабое спектральное разрешение в случае коротких выборок сигнала, поэтому были разработаны методы оценивания АР-коэффициентов, обеспечивающие улучшение спектрального разрешения. К ним относятся *метод Берга*, *ковариационный метод* и *модифицированный ковариационный метод*.

Алгоритм Берга идентичен геометрическому, однако оценка коэффициента отражения находится следующим образом: при каждом значении параметра p в нем минимизируется арифметическое среднее мощности ошибок линейного предсказания вперед и назад (то есть выборочная дисперсия ошибки предсказания). Приравнивая производные к нулю, имеем оценку для K_p :

$$K_p = - \frac{2 \sum_{n=p+1}^N n_{p-1}^f [n] n_{p-1}^{b*} [n-1]}{\sum_{n=p+1}^N (n_{p-1}^f [n])^2 + \sum_{n=p+1}^N (n_{p-1}^b [n-1])^2} \quad (5)$$

Однако метод Берга обладает серьезным недостатком. Он заключается в расщеплении при некоторых условиях спектрального пика, соответствующего одной гармонической составляющей. Марпл-мл [1] отмечает и другие недостатки данного метода, в том числе появление ложных спектральных пиков и смещение частотных оценок. Учитывая вышесказанное, а также то, что частотное разрешение метода Берга не является самым высоким, можно сделать вывод о нецелесообразности применения его в спектральных моделях.

Ковариационный и модифицированный ковариационный методы основаны на одном и том же алгоритме минимизации методом наименьших квадратов одновременно всех коэффициентов линейного предсказания. Ковариационные методы более точны в оценке частоты и частотного разрешения, но одновременно значительно ухудшается устойчивость этих алгоритмов.

Цель исследования, постановка задачи. С целью проверки работоспособности программ был поставлен ряд экспериментов. Для экспериментальных исследований был взят участок ритмограммы здорового

человека. Оцениваем две ритмограммы длительностью по 5 минут, снятых ночью (0:20) во время сна и днём (18:25) во время физической работы.

Результаты исследования. В ходе анализа было выяснено, что у здорового человека во время сна и в состоянии покоя продолжительность R-R-интервалов увеличивается, дыхание замедляется, следовательно, спектральный анализ показывает преобладание высокочастотной компоненты (HF), а следовательно, активностью парасимпатической вегетативной нервной системы (рис. 1).

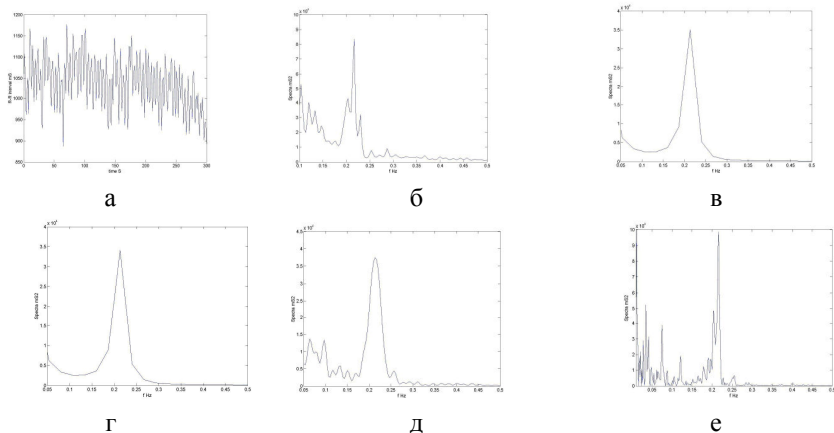


Рис. 1 – Анализ ритмограммы здорового человека в состоянии покоя: а – ритмограмма, б – периодограммный метод, в – метод Уэлча, г – метод Юла-Уолкера, д – метод Берга, е – ковариационный метод

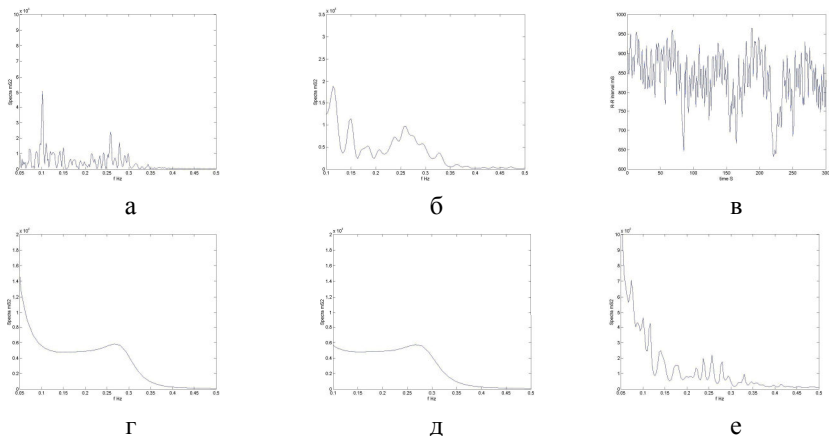


Рис. 2 – Анализ ритмограммы здорового человека в активном состоянии: а – ритмограмма, б – периодограммный метод, в – метод Уэлча, г – метод Юла-Уолкера, д – метод Берга, е – ковариационный метод

В активном же состоянии у здорового человека, например, при мышечной работе, эмоциональном возбуждении, беге, и как следствие, гипоксии, продолжительность R-R-интервалов уменьшается, и спектральный анализ показывает преобладание низкочастотной компоненты спектра (LF) (рис. 2).

По результатам спектрального анализа может быть вычислен индекс отношения LF/HF, определяющий баланс влияния симпатической и парасимпатической системы на организм человека.

Помимо определения состояния покоя или активности человека, по соотношению составляющих спектра можно диагностировать различные патологии человека.

Для экспериментального исследования был взят участок ритмограммы с патологией в виде фибрилляции предсердий (рис. 3).

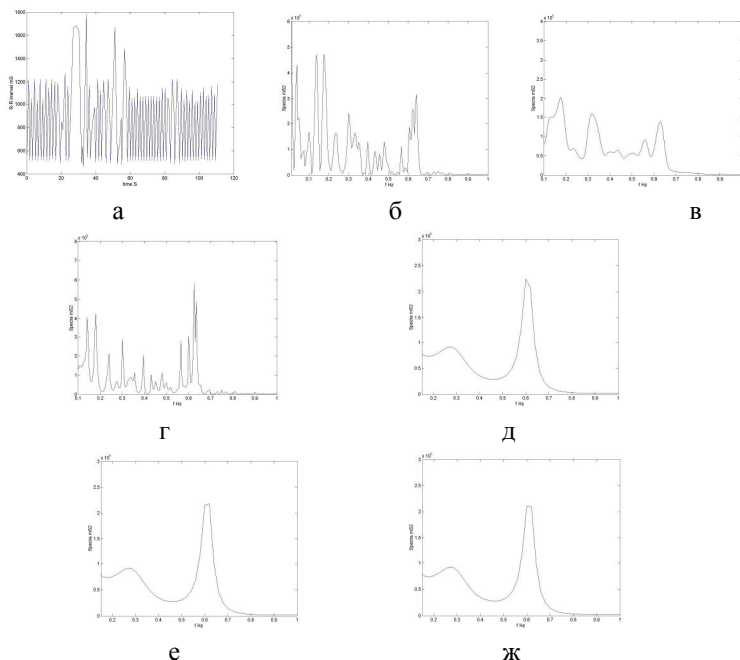


Рис. 3 – Анализ ритмограммы с фибрилляцией предсердий: а) ритмограмма с фибрилляцией предсердий; б) периодограммный метод; в) метод Уэлча; г) метод Юла – Уолкера; д) метод Берга; е) ковариационный метод; ж) мод. ковариационный метод

По тестовым данным видно, что продолжительность R-R-интервалов практически одинакова, с некоторыми непродолжительными скачками, что

уже указывает на наличие патологии, и спектральный анализ показывает преобладание высокочастотной компоненты (HF), а следовательно, активностью парасимпатической вегетативной нервной системы, и нахождение человека в состоянии покоя, но также появляются и другие низкочастотные спектры, которые указывают на патологию и доказывает, что для теста был взят участок ритмограммы с патологией в виде фибрилляции предсердий.

Выводы. В результате испытаний разработанных программ на реальных и тестовых данных выявлены преимущества и недостатки выбранных методов цифрового спектрального анализа (ЦСА). Установлено, что выбирать более подходящий метод ЦСА нужно в зависимости от характеристик анализируемого сигнала. Наиболее устойчивые оценки спектра обеспечивают ковариационный и модифицированный ковариационный методы, позволяющие выделить спектральные составляющие, соответствующие тем или иным характеристикам ритмограммы.

В целом содержание работы носит прикладную направленность, полученные теоретические результаты служат основой разработки конкретных алгоритмов и программ спектрально-корреляционной оценки кардиосигнала как для персональных компьютеров, так и для специализированных микроконтроллерных устройств.

Применение полученных алгоритмов спектрального анализа возможно для широкого класса биомедицинских сигналов, например для обработки энцефалограмм с целью определения биспектрального индекса.

Список литературы: 1. *С.Л. Марпл-мл.* Цифровой спектральный анализ. – М.: МИР, 1990. 2. *А.В. Ивашко* Методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов. – Х.: НТУ «ХПИ», 2005-240с. 3. *Баевский Р.М., Иванов Г.Г.* Вариабельность сердечного ритма: теоретические аспекты и возможности клинического применения. – М.: Медицина, 2000.-295с. 4. *Баевский Р.М., Кириллов О.И., Клецкин С.З.* Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. – М.: Наука, 1984. 5. *Рябыкина Г.В., Соболев А.В.* Вариабельность ритма сердца. – М.: Старко, 1998.

УДК 621.391

Методы и алгоритмы спектрально-корреляционной обработки кардиосигналов / А. В. Ивашко, Д. А. Лунин, А. А. Подлюзня // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 8 (982). – С. 41–46. – Бібліогр.: 7 назв.

У статті розглянуті алгоритми цифрового спектрального аналізу, на основі перетворення Фур'є. Проведено порівняльний аналіз методів спектрального аналізу цифрових сигналів. На основі експерименту висунуті пропозиції щодо обрання оптимального методу цифрового аналізу.

Ключові слова: спектр, спектральний аналіз, ритмограми, електрокардіограма, варіабельність серцевого ритму, алгоритм, цифровий сигнал.

In this paper algorithms for digital spectral analysis, based on Fourier transform. A comparative analysis of methods of spectral analysis of digital signals. Based on the experiment put forward proposals for the selection of an optimum method of digital analysis.

Keywords: spectrum, spectrum analysis, rhythmogram, electrocardiogram, heart rate variability, the algorithm, the digital signal.