

УДК 612.172.2+ 681.3

ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ УЧАСТКОВ ЛОКАЛЬНЫХ НЕСТАЦИОНАРНОСТЕЙ В РИТМОКАРДИОГРАФИЧЕСКИХ СИГНАЛАХ

А.И. МАЙСТРОВ¹, А.В.БОГОМОЛОВ², М.Д.АЛЁХИН¹¹Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана,²Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины,
E-mail: amaistrov@gmail.com, a.v.bogomolov@gmail.com, alexmakc@narod.ru

Аннотация: Систематизированы методы анализа стационарности сигналов и отмечена ограниченность их применимости к задаче исследования стационарности ритмокардиографических сигналов, решение которой необходимо для корректного расчета оценок спектральных показателей variability сердечного ритма. Описаны два паттерна нарушения стационарности, типично наблюдаемые в пятиминутных ритмокардиограммах, и представлены два эффективных метода их распознавания и обработки.

Ключевые слова: анализ стационарности сигналов, моделирование ритмокардиограмм, variability ритма сердца.

TECHNOLOGY AREAS OF LOCAL TREATMENT OF AUTOMATED NON-STATIONARY SIGNALS AT HEART RATE VARIABILITY

A.I.MAISTROV¹, A.V.BOGOMOLOV², M.D.ALEKHIN¹¹Moscow State Technical University named after Bauman, Moscow,²State Scientific Research Testing Institute of Military Medicine, Moscow,
E-mail: amaistrov@gmail.com, a.v.bogomolov@gmail.com, alexmakc@narod.ru

Abstract: Systematized methods of analysis of stationary signals and noted the limitations of their applicability to the problem of steady-state studies signals at heart rate variability necessary for correct calculation of the spectral estimates of heart rate variability. Described two patterns of stationary violations, typically observed in the five-minute signals at heart rate variability, and are two effective methods of detection and treatment.

Key words: analysis of stationary signals, modeling signals at heart rate variability, heart rate variability.

Одними из информативных показателей функционального состояния человека являются показатели спектральной мощности ритмокардиографических сигналов – *ритмокардиограмм* (РКГ) [2]. Однако, как показывает практический опыт, имеются существенные сложности в выполнении спектрального анализа РКГ из-за наличия большого числа модификаций алгоритмов реализации методики расчета оценок спектральных показателей РКГ и отсутствия рекомендаций по их применимости, эффективности и воспроизводимости результатов. Как следствие, серийно выпускаемые приборы вариационной пульсометрии выдают несопоставимые результаты [5 – 7, 9]. Для одинаковых сигналов без артефактов и искажений полученные с помощью различных комплексов оценки спектральной плотности мощности одних и тех же РКГ существенно различаются - расхождение в оценке общей мощности достигает 50%, очень низкочастотного показателя 90%, низкочастотного показателя 70% и высокочастотного показателя 150%. Это приводит к существенным ошибкам диагностики. Поэтому совершенствование методов обработки РКС остается актуальной задачей.

Одним из требований, предъявляемых к сигналу для возможности адекватной оценки спектральной плотности его мощности с помощью широко распространенных (классических) методов спектрального анализа, является стационарность сигнала. Стационарность сигнала в широком смысле означает сохранение его среднего значения и дисперсии на протяжении всего анализируемого фрагмента и независимость корреляционной функции от начала отсчета. РКГ-сигнал по своей природе является нестационарным сигналом, в котором постоянно прослеживаются адаптационные процессы. Практическая реализация методов исследования стационарности оказывается отличной от теоретического определения и в целом редко привлекает специалистов по анализу ВСР, что и обусловило актуальность исследования.

Методы анализа стационарности сигналов. Методы анализа стационарности сигналов подразделяются на параметрические и непараметрические.

Среди параметрических методов наиболее часто используются методы: Филлипса–Перрона, Дикки–Фуллера, расширенный Дикки–Фуллера, KPSS–тест. Эти методы проверяют гипотезу о наличии нестационарностей специального (устраняемого) вида, которые можно исключить при помощи специальных методик [10].

Среди непараметрических методов наиболее часто используются методы: Вальда–Вольфовица, обратной расстановки, локальные дискретные преобразования Фурье, вейвлет–анализ. Эти методы имеют неудовлетворительно низкую статистическую мощность и, как показано в работе [7], на реальных записях ЭКГ для успешного выделения участков нестационарности оказывается необходимым использовать три одновременно регистрируемых сигнала: РКГ, систолического и диастолического давления.

Паттерны нестационарности в пятиминутных РКГ-сигналах. Большинство реальных РКГ-сигналов с помощью названных параметрических и непараметрических методов оказываются отнесен-

ными к нестационарным из-за своей хаотической природы. Однако часто РКГ-сигнал оказывается нестационарен только локально (в ограниченной области), и тогда имеет смысл проводить его фильтрацию для устранения коротких фрагментов нестационарности, чтобы избежать полного исключения фрагмента из рассмотрения (аналогом являются классические процедуры устранения участков ненормотопных участков РКГ [1 – 3, 9]).

Анализ особенностей часто применяющихся на практике пятиминутных РКГ-сигналов, не проходящих тесты на стационарность, позволил выделить набор типичных паттернов нестационарности, соответствующих этой длительности РКГ:

- псевдолинейный тренд, к которому относятся все виды переходных процессов, сопровождающихся существенным изменением ЧСС от начала фрагмента РКГ к его концу;
- сдвиг фрагмента РКГ-сигнала – кратковременное ускорение или замедление ритма (рис. 1), не характеризующееся периодичностью, но существенно нарушающее стационарность сигнала.

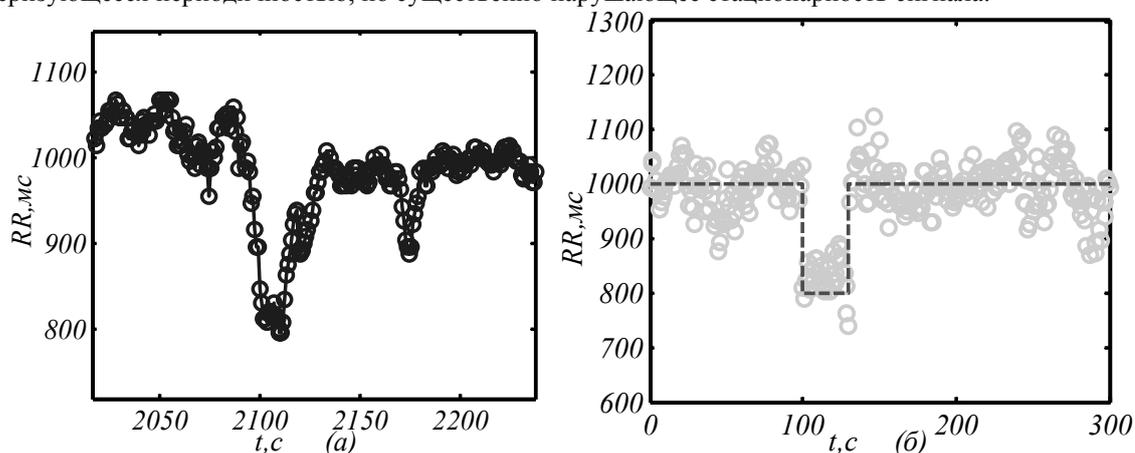


Рис. 1. Представление паттерна сдвига фрагмента РКГ-сигнала на реальном сигнале (а) и пример моделирования такого паттерна (б).

Особенности выделения паттернов в пятиминутных РКГ-сигналах. Основываясь на выводах работы [8], можно считать, что дисперсия РКГ-сигнала редко быстро и существенно изменяется без изменения частоты сердечных сокращений (ЧСС), так же редко может наблюдаться обратная ситуация, в которой ЧСС изменяется без изменения дисперсии. На основе этого предположения следует, что:

- детрендирование (выделение и вычитание линейного тренда) реального РКГ-сигнала для проведения корректного спектрального анализа бессмысленно, так как дисперсия на протяжении анализируемого сигнала останется искаженной;
- тест на стационарность можно проводить по наличию или отсутствию тренда в сигнале.

Анализ точности определения спектральных показателей ВСП на модельных сигналах [4 – 6, 11] позволил выделить группу РКГ-сигналов с наличием псевдотренда, расчет оценок спектральных показателей ВСП для которых невозможен (в качестве порогового условия для исследования эффективности тестов принято, что квадратичное среднее относительных отклонений расчета ошибок оценок спектральных показателей ВСП не должно превышать 50%) [2 – 7]. Наиболее робастно выделять такие сигналы удается используя соотношение:

$$a_{\sigma} = a_p / \sigma(x_l),$$

где a_p – коэффициент в выражении линейной регрессии по исследуемому РКС $y = a_p x + b$, оптимальной по методу наименьших квадратов,

$\sigma(x_l)$ – стандартное (среднее квадратическое) отклонение (СКО) длительности RR-интервала в РКГ-сигнале. Если $a_{\sigma} > 0,45$, то сигнал считается нестационарным и исключается из рассмотрения. Пороговое значение коэффициента определено по модельным сигналам таким образом, чтобы максимизировать специфичность выделения нестационарных сигналов (с ошибкой расчета оценок спектральных показателей ВСП, превышающей 50%) при априорно заданном уровне чувствительности 80%.

Паттерны типа сдвига фрагмента характеризуются существенным сдвигом длительности части RR-интервалов относительно распределения их длительностей в пятиминутном РКГ-сигнале. Поэтому их возможно устранять, выделяя группы RR-интервалов, длительность которых существенно (более, чем на ± 3 СКО) отличается от медианы распределения длительностей RR-интервалов, а затем, вырезая фрагменты смежных RR-интервалов, имеющих близкие длительности.

Анализ эффективности методики устранения паттернов сдвига проводился на наборах модельных сигналов. В качестве набора модельных сигналов использовались 1000 сигналов, сформированных по методике [4], к которым добавлялись искусственные паттерны нестационарности (рис.1б) с реалистичными параметрами. Применение алгоритма для выделения паттернов позволило достичь 92,5% чувствительности обнаружения таких паттернов. При этом средняя ошибка расчета оценок спектральных пока-

зателей (1) уменьшились с 68,2% до 18,4%. В оставшихся случаях (7,5%), когда паттерны не удалось обнаружить, среднее увеличение ошибки расчета оценок спектральных показателей составило 13,8%, что значительно меньше исходной разницы в ошибках (68,2% и 18,4%), т.е. алгоритм можно характеризовать как эффективный.

Выводы. Применение комбинации разработанных алгоритмов выделения и обнаружения паттернов нестационарности улучшает качество расчета оценок спектральных показателей ВСР и повышает точность и обоснованность диагностических решений, принимаемых на их основе. Однако наиболее эффективная схема последовательности их применения (сначала исследование тренда - затем устранение паттернов сдвига, или наоборот) требует проведения дополнительных исследований.

Литература

1. Алёхин, М.Д. Метод биорадиолокации в анализе перемещений грудной клетки при спокойном дыхании / М.Д. Алёхин, Л.Н. Анищенко, Д.А. Корчагина // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2009. – № 10. – С. 56–61.
2. Баевский, Р.М. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации) / Р.М. Баевский, Г.Г. Иванов, Л.В. Чирейкин и др. // Вестник аритмологии. – 2001. – № 24. – С. 65–87.
3. Богомолов, А.В. Концепция математического обеспечения диагностики состояния человека / А.В. Богомолов // Информатика и системы управления. – 2008. – № 2 (16). – С. 11–13.
4. Богомолов, А.В. Моделирование ритмокардиографических сигналов в частотной области / А.В. Богомолов, А.И. Майстров // Динамика сложных систем. – 2009. – № 3(1). – С. 49–58.
5. Богомолов, А.В. Теоретико-экспериментальное исследование сходимости оценок спектральных показателей variability сердечного ритма человека, рассчитанных в результате обработки тахограммы частоты сердечных сокращений и ритмокардиограммы / А.В. Богомолов, А.И. Майстров // Медицинская техника. – 2009. – №2. – С. 26–31.
6. Кукушкин, Ю.А. Методы аппроксимации ритмокардиограмм для расчета оценок спектральных показателей variability сердечного ритма / Ю.А. Кукушкин, А.И. Майстров, А.В. Богомолов // Медицинская техника. – 2010. – № 3. – С. 15–30.
7. Castiglioni, P. How to check steady-state condition from cardiovascular time series / M.D. Rienzo // Physiological measurement. – 2004. – № 25. – PP. 985–996.
8. Hallstrom, A.P. Structural relationships between measures based on heart beat intervals: Potential for improved risk assessment / A.P. Hallstrom, P.K. Stein, R. Schneider et al. // Trans. Biomed. Eng. – 2003. – № 19. – PP. 1–8.
9. Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. // Circulation. – 1996. – № 93(5). – PP. 1043–1065.
10. Kwiatkowski, P.C. Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root 1: How sure are we that economic time series have a unit root? / P.C. Kwiatkowski, P.C.B. Phillips, P. Schmidt // Journal of econometrics – 1992. – № 1–3 (54). – PP. 159–178.
11. Maistrou, A.I. Implicit Comparison of Accuracy of Heart Rate Variability Spectral Measures Estimated via Heart Rate and Heart Period Signals / A.I. Maistrou // IEEE conference proceedings Computers in Cardiology.–Bologna (Italy), 2008.– PP. 553–556.