

# **ОЦЕНКА ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ И НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА КОРОТКИХ КАРДИОИНТЕРВАЛОГРАММ**

*КАМИНСКИЙ А.А.*

---

Описываются частотные характеристики двух «коротких» кардиоинтервалограмм, полученные с использованием параметрических и непараметрических методов спектрального анализа. Проводится сравнительный анализ полученных результатов, на основании которого выявляются показатели variability сердечного ритма, не меняющиеся в зависимости от используемого метода, а также показатели, которые чувствительны к выбору метода.

РИ, 2010, № 3

## **Введение**

Анализ variability сердечного ритма (ВСР) является методом оценки состояния механизмов регуляции физиологических функций в организме человека и животных, в частотности, общей активности регуляторных механизмов, нейрогуморальной регуляции сердца, соотношения между симпатическим и парасимпатическим отделами вегетативной нервной системы [1].

Метод основан на распознавании и измерении временных интервалов между R-зубцами ЭКГ (R-R интервалы), построении динамических рядов кардиоинтервалов и последующего анализа полученных числовых рядов различными математическими методами. При этом динамический ряд кардиоинтервалов называют кардиоинтервалограммой (КИГ) [1].

При анализе КИГ различают кратковременные («короткие») и долговременные («длинные») записи. Под

последними, как правило, понимают данные, получаемые при 24- и 48- часовом мониторинге ЭКГ. К так называемым «коротким» записям относят данные исследований, проводимых в течение минут, десятков минут или нескольких часов [1].

Методы анализа динамических рядов кардиоинтервалов можно разделить на три больших класса:

- исследование общей variability (статистические методы) [2];
- исследование периодических составляющих ВСР (спектральный анализ) [2];
- исследование внутренней организации динамического ряда кардиоинтервалов (автокорреляционный анализ, корреляционная ритмография, методы нелинейной динамики) [2].

Спектральные методы анализа ВСР получили в настоящее время очень широкое распространение. Анализ спектральной плотности мощности колебаний дает информацию о распределении мощности колебаний в зависимости от их частоты. Применение спектрального анализа позволяет качественно оценить различные частотные составляющие колебаний ритма сердца и наглядно графически представить соотношения разных компонент сердечного ритма, отражающих активность определенных звеньев регуляторного механизма [1].

Различают параметрические и непараметрические методы спектрального анализа. К первым относят авторегрессионный анализ, ко вторым – быстрое преобразование Фурье (БПФ). Каждый из этих методов имеет свои достоинства, недостатки и особенности применения для анализа КИГ.

*Целью* данной работы является сравнительное исследование методов спектрального анализа кардиосигнала на примере анализа «коротких» кардиоинтервалограмм.

### Материалы и методы исследований

Объектом исследований стали две «короткие» КИГ продолжительностью 5 минут. Обе КИГ взяты из общедоступных баз данных: The MIT-BIH Normal Sinus Rhythm Database [5] и MIT-BIH Arrhythmia Database [5]. Первая КИГ RRnorm(n) соответствует нормальному синусному ритму (рис. 1,а), а вторая RRaritm(n) – КИГ с аритмией (рис. 1,б).

Методами исследований стали частотные методы анализа ВСР. Согласно этим методам, вначале определяется спектральная плотность мощности (PSD) КИГ в диапазоне частот 0,003...0,4 Гц. Затем, интегрируя полученную спектральную плотность в стандартизированных диапазонах частот (VLF, LF, HF), получают мощности соответствующих спектральных компонент.

При использовании непараметрических методов расчета PSD случайного процесса используется только информация, заключенная в отсчетах сигнала, без

каких-либо дополнительных предположений. Оценкой спектральной плотности мощности, полученной по N отсчетам одной реализации случайного процесса, является периодограмма, рассчитываемая по следующей формуле [3]:

$$W(f) = \frac{1}{N \cdot f_d} \left| \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot \exp(-i2\pi k) \right|^2, \quad (1)$$

где  $x(k)$  – исходная дискретная последовательность с частотой дискретизации  $f_d$ ;  $T = 1/f_d$  – величина, обратная частоте дискретизации.

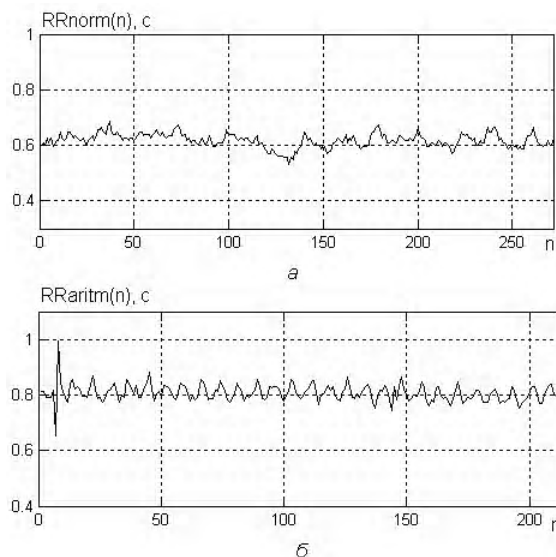


Рис. 1. Исследуемые кардиоинтервалограммы: а – КИГ RRnorm(n), соответствующая нормальному синусному ритму; б – КИГ RRaritm(n) с аритмией

При использовании параметрических методов подразумевается наличие некоторой математической модели анализируемого случайного процесса. Спектральный анализ сводится в данном случае к решению оптимизационной задачи, т.е. поиску таких параметров модели, при которых она наиболее близка к реально наблюдаемому сигналу.

Среди возможных параметрических методов спектрального анализа наибольшее распространение получили методы, основанные на авторегрессионной модели формирования сигнала: метод Берга, ковариационный метод, метод Юла-Уолкера. Согласно этим методам, сигнал  $x(k)$  формируется путем пропуска дискретного белого шума через рекурсивный фильтр N-го порядка. PSD такого сигнала пропорциональна квадрату модуля коэффициента передачи фильтра [4]:

$$W(\omega) = \frac{\sigma_n^2}{f_d} \frac{1}{|1 - a_1 e^{-i\omega T} - a_2 e^{-i2\omega T} - \dots - a_N e^{-iN\omega T}|^2}. \quad (2)$$

Таким образом, данные методы спектрального анализа сводятся к определению коэффициентов модели  $a_n$  заданного порядка N, оценке мощности белого шума  $\sigma_n^2$  и расчету спектральной плотности мощности по формуле (2).

Так как существуют разные методы частотного анализа ВСП, представляет интерес сравнение результатов, получаемых с их использованием.

### Результаты и их обсуждение

Был проведен расчет PSD обеих КИГ непараметрическими методами с помощью разных оконных функций с использованием:

- 1) прямоугольного окна (рис. 2,а, рис. 4,а);
- 2) окна Ханна (рис. 2,б, рис. 4,б);
- 3) окна Блэкмена (рис. 2,в, рис. 4,в).

Затем был проведен расчет PSD обеих КИГ с использованием параметрических авторегрессионных методов:

- 1) ковариационного метода (рис. 3,а, рис. 5,а);
- 2) метода Берга (рис. 3,б, рис. 5,б);
- 3) метода Юла–Уолкера (рис. 3,в, рис. 5,в).

При использовании авторегрессионных методов важно правильно выбрать порядок авторегрессионной модели – он должен быть в два раза больше числа синусоидальных колебаний, которые предположительно содержатся в анализируемом сигнале. В данном случае мы задались порядком  $N=10$ , значение которого типично для параметрического спектрального анализа ВСП [2].

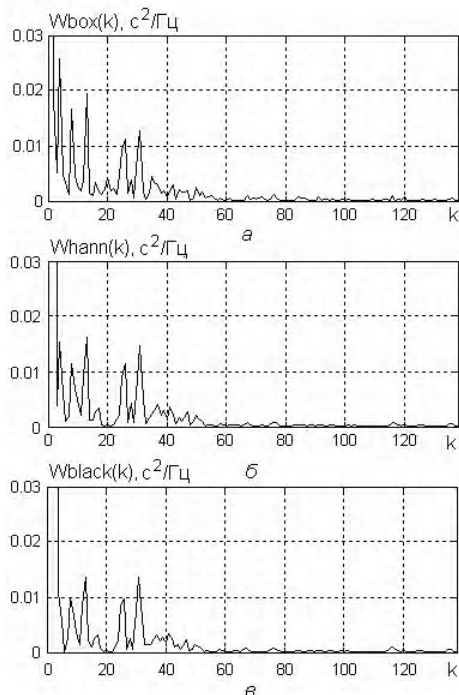


Рис. 2. Спектральная плотность кардиоинтервалограммы  $RRnorm(n)$ . Непараметрические методы: а – PSD с использованием прямоугольного окна; б – окна Ханна; в – окна Блэкмена

Спектральные плотности КИГ построены в области частот  $f = 0 \dots 0,4$  Гц. Для пересчета спектральных отсчетов  $k$  в частоту  $f$  необходимо использовать следующее соотношение:

$$f = \frac{k}{N_{RR}} \cdot f_{ЧСС}, \quad (3)$$

где  $N_{RR}$  – общее количество R-R интервалов (для кардиоинтервалограммы  $RRnorm(n)$   $N_{RR}=482$ , для  $RRaritm(n)$   $N_{RR}^I=371$ ),  $f_{ЧСС}$  – средняя частота сердечных сокращений (для кардиоинтервалограммы  $RRnorm(n)$   $f_{ЧСС}=1,4$  Гц, а для  $RRaritm(n)$   $f_{ЧСС}^I=1,23$  Гц).

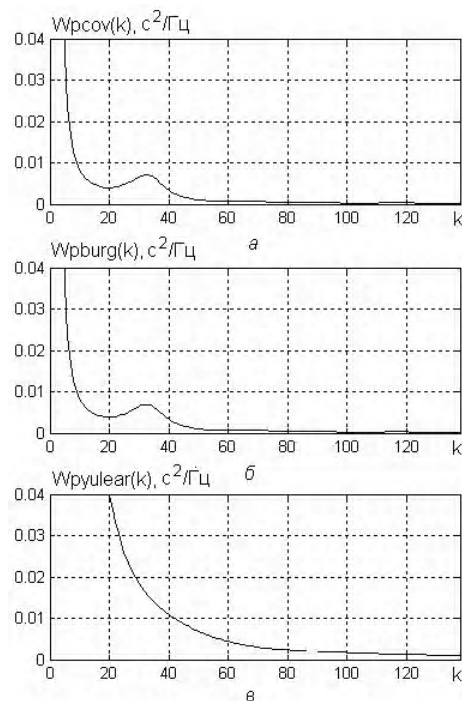


Рис. 3. Спектральная плотность кардиоинтервалограммы  $RRnorm(n)$ . Параметрические методы: а – ковариационный метод; б – метод Берга; в – метод Юла–Уолкера

Из рис. 2 и рис. 4 видно, что в результате применения непараметрических методов спектральные плотности имеют «изрезанный» вид и состоят либо из узких гармоник с быстро убывающей амплитудой (КИГ  $RRnorm(n)$ ), либо в спектре присутствует одна преобладающая гармоника (КИГ  $RRaritm(n)$ ). В целом, применение различных оконных функций не приводит к заметному изменению получаемых спектров.

Но все же отметим и отличия спектральной плотности КИГ, связанные с применением различных оконных функций. Применение окон с более широкими спектрами (например, окна Блэкмена) приводит к большему «размыванию» острых гармоник спектров. С одной стороны, это приводит к тому, что спектры становятся более гладкими, но с другой – на границах частотных диапазонов (LF-HF, VLF-LF) происходит взаимное проникновение гармоник различных диапазонов частот. Такой эффект существенно проявляется на нижней границе диапазона частот VLF, так как ее частота, равная 0,003 Гц, соответствует согласно формуле (3) первому или второму спектральному отсчету. При этом спектральная плотность нулевого отсчета (постоянная составляющая) на несколько по-

рядков больше всех рядом стоящих гармоник. Поэтому, при применении непараметрических методов с применением окон Блэкмена либо Ханна, в алгоритме расчета PSD следует предусмотреть подавление постоянной составляющей сигнала (вычесть среднее значение кардиоинтервалов RRNN из каждого кардиоинтервала).

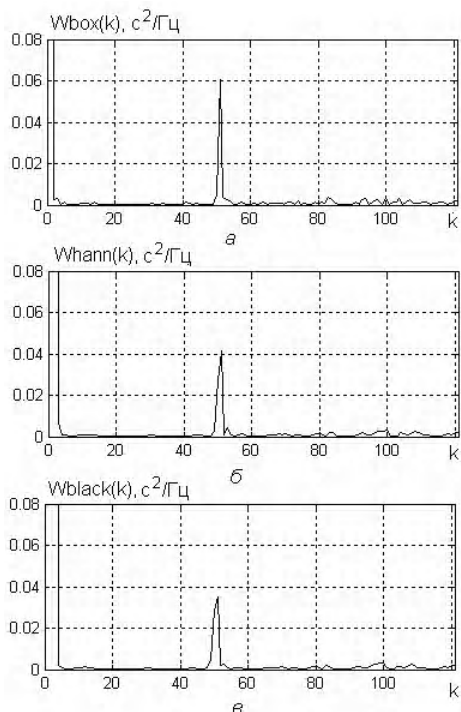


Рис. 4. Спектральная плотность кардиоинтервалограммы RRaritm(n). Непараметрические методы: а – PSD с использованием прямоугольного окна; б – окна Ханна; в – окна Блэкмена

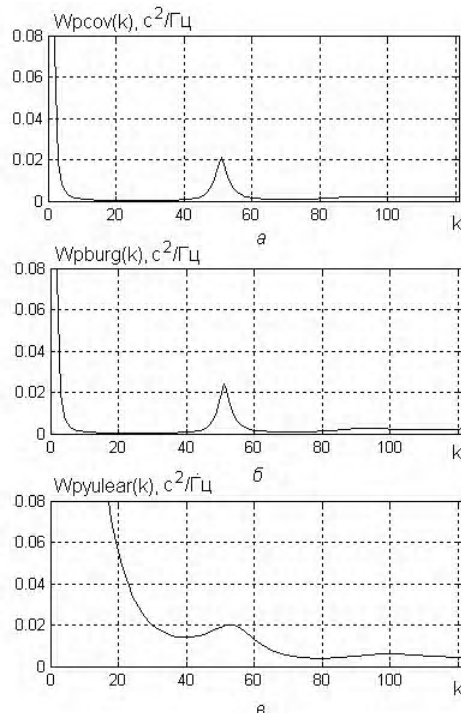


Рис. 5. Спектральная плотность кардиоинтервалограммы RRaritm(n). Параметрические методы: а – ковариационный метод; б – метод Берга; в – метод Юла-Уолкера

Применение параметрических методов Берга и ковариационного метода приводит к получению схожих результатов (см. рис. 3,а,б, рис. 5,а,б). Метод Юла-Уолкера (см. рис. 3,в, рис. 5,в) дает значительно большую спектральную плотность в диапазоне частот VLF по сравнению со всеми другими методами, что, очевидно, связано с недостаточной длительностью сигнала для данного метода [4].

Сами спектры, получаемые параметрическими методами, имеют гладкую форму с одним выраженным экстремумом, находящимся в области низких частот (LF) для КИГ RRnorm(n) (см. рис. 3,а,б), и одним экстремумом на границе низких и высоких частот (LF-HF) для КИГ RRaritm(n) (см. рис. 5,а,б).

Положение экстремумов, получаемых параметрическими и непараметрическими методами, можно считать одинаковым для КИГ RRnorm(n), если предположить, что экстремум, отчетливо выраженный при применении параметрических методов (см. рис. 3, а,б), соответствует двум близко расположенным экстремумам при использовании непараметрических методов (см. рис. 2).

Немного иначе обстоят дела при рассмотрении экстремумов для КИГ RRaritm(n). На первый взгляд, положение одного ярко выраженного экстремума, при применении различных методов, одинаково (см. рис. 4,5). Но сам экстремум, как уже говорилось, расположен на границе двух частотных диапазонов (LF-HF), поэтому, если немного изменилась бы сама исследуемая КИГ, очень вероятно случай существенного различия получаемых результатов при проведении исследования ВСП одного и того же человека в разное время. Из этого следует, что более адекватные результаты будут получены с использованием параметрических методов спектрального анализа, так как сам экстремум имеет более широкое основание: возможное перемещение экстремума не будет давать резкого смещения баланса в сторону LF или HF частот.

В табл. 1-4 приведены рассчитанные частотные характеристики КИГ RRnorm(n) и RRaritm(n).

Сравнивая частотные характеристики КИГ, следует помнить о проблемах, связанных с повторяемостью результатов исследования. Это означает, что нет смысла сравнивать расхождения частотных характеристик,

Таблица 1. Частотные характеристики кардиоинтервалограммы RRnorm(n), непараметрические методы

Показатель	Непараметрические методы		
	прямоуг-е окно	Ханна	Блэкмена
HF, мс <sup>2</sup>	72,0	57,2	54,1
LF, мс <sup>2</sup>	310,2	299,7	274,0
VLF, мс <sup>2</sup>	259,1	229,3	2813,8
HFnorm	0,18	0,16	0,16
LFnorm	0,81	0,83	0,83
LF/HF	4,3	5,237	5,06

Таблица 2. Частотные характеристики кардиоинтервалограммы RRnorm(n), параметрические методы

Показатель	Параметрические методы		
	ков-ный	Берга	Юла–Уолкера
HF, мс <sup>2</sup>	102,9	102,2	573,6
LF, мс <sup>2</sup>	452,8	443,9	2607,3
VLF, мс <sup>2</sup>	955,8	950,5	22446,6
HFnorm	0,18	0,18	0,18
LFnorm	0,81	0,81	0,81
LF/HF	4,4	4,3	4,5

Таблица 3. Частотные характеристики кардиоинтервалограммы RRaritm(n), непараметрические методы

Показатель	Непараметрические методы		
	прямоуг-е окно	Ханна	Блэкмена
HF, мс <sup>2</sup>	373,9	372,3	363,4
LF, мс <sup>2</sup>	33,1	36,3	36,9
VLF, мс <sup>2</sup>	23,7	33,2	3355,9
HFnorm	0,92	0,91	0,91
LFnorm	0,08	0,09	0,09
LF/HF	0,09	0,10	0,10

Таблица 4. Частотные характеристики кардиоинтервалограммы RRaritm(n), параметрические методы

Показатель	Параметрические методы		
	ков-ный	Берга	Юла–Уолкера
HF, мс <sup>2</sup>	558,5	617,8	1565,5
LF, мс <sup>2</sup>	43,4	44,3	3712,2
VLF, мс <sup>2</sup>	121,7	124,6	32315,5
HFnorm	0,93	0,93	0,30
LFnorm	0,07	0,07	0,70
LF/HF	0,08	0,07	2,37

полученных разными методами, не учитывая их же расхождения при повторном эксперименте в тех же условиях. Ведь известным является тот факт, что даже две КИГ, записанные последовательно друг за другом, могут существенно различаться [1]. Поэтому, сравнивая полученные относительные частотные характеристики (LF/HF, HFnorm, LFnorm) для обеих КИГ (RRnorm(n), RRaritm(n)), которые характеризуют симпато-вагусный баланс, можно отметить их идентичность (не учитывая метод Юла-Уолкера, который не пригоден для анализа коротких записей).

Показатель VLF, характеризующий мощность очень низкочастотного компонента ВСП, при применении как параметрических, так и непараметрических методов имеет существенно отличающиеся значения, что связано с недостаточной продолжительностью записи. Поэтому при анализе «коротких» записей следует отказаться от его трактовки, либо необходимо сузить диапазон частот, учитываемых данным показателем.

Показатели LF и HF, которые характеризуют мощность низкочастотной и высокочастотной компонент ВСП, практически не отличаются при применении как параметрических, так и непараметрических методов. Сравнивая между собой численные результаты, полученные параметрическими и непараметрическими методами, следует отметить, что первые дают приблизительно в 1,5 раза большие значения показателей, чем вторые. Это связано с существенно разными подходами к расчету спектральной плотности.

В целом, использование различных методов спектрального анализа, в конечном итоге, приводит к получению одинаковых результатов. Но, сравнивая результаты разных исследований, следует учитывать возможность их расхождения из-за применения различных методов спектрального анализа.

### Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Относительные частотные характеристики LF/HF, HFnorm и LFnorm, получаемые различными методами спектрального анализа, идентичны.
2. Параметрический метод Юла-Уолкера не пригоден для анализа коротких кардиоинтервалограмм.
3. Показатели LF и HF могут значительно отличаться при использовании параметрических и непараметрических методов.
4. Применение различных оконных функций не приводит к существенному изменению получаемых частотных характеристик.

Практическая значимость: результаты исследований могут быть использованы специалистами при изучении ВСП для сопоставления частотных характеристик ритма, полученных с помощью различных методов спектрального анализа.

**Литература:** 1. Баевский Р.М. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (Методические рекомендации) /Р.М.Баевский // Вестник аритмологии. 2001.№24. С.65-87. 2. *Вариабельність* серцевого ритму: Стандарти вимірювання, фізіологічної інтерпретації та клінічного використання / Пер. з англ. Львів, 2002. 70 с. 3. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов /Л. Рабинер, Б.Гоулд. М.:Мир, 1978. 835с. 4. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. СПб.:Питер, 2003. 604с. 5. *PhysioBank Archive Index*: [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://www.physionet.org/physiobank/database/>.

Поступила в редколлегию 11.12.2010

Рецензент: д-р биол.наук, проф. Кочина М.Л.

**Каминский Антон Александрович**, аспирант ХНУРЭ. Научные интересы: оценка функционального состояния человека. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина 14, e-mail: siddos@mail.ru.