

УДК 615.47:616-072.7

О.Н. Величко, О.Е. Гапон

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

ПЕРЕДИСКРЕТИЗАЦИЯ ТАХОГРАММЫ. ПРОБЛЕМА ВЫБОРА ИНТЕРВАЛА ПЕРЕДИСКРЕТИЗАЦИИ

Спектральная оценка variability сердечного ритма часто включает в себя использование быстрого преобразования Фурье, одним из условий которого является равномерно распределенные во времени исходные данные. Их получают путем передискретизации (различные методы интерполяции). Но остается нерешенным вопрос о том, какой интервал передискретизации применить, чтобы минимизировать ошибку интерполяции.

Ключевые слова: variability сердечного ритма, RR-интервал, тахограмма, ритмограмма, передискретизация, интервал передискретизации, спектральный анализ, частотные составляющие.

Введение

В настоящее время определение variability сердечного ритма (ВСР) признано наиболее информативным неинвазивным методом количественной оценки вегетативной регуляции сердечного ритма. Многие зарубежные исследователи [1 – 7] изучают влияние используемых методов предварительной обработки тахограммы (передискретизации) на её спектральную оценку. Но на данный момент не изучен вопрос влияния интервала передискретизации Ωd на ряд показателей, которые используются при анализе спектра и учитываются далее при расчете интегральных характеристик ВСР. В литературе вопросу выбора интервала передискретизации внимание не уделяется, несмотря на влияние Ωd на спектральные показатели передискретизированной тахограммы. В

этой статье приведены результаты исследования влияния интервала передискретизации Ωd на основные характеристики, используемые при анализе ВСР.

Цель данной статьи – установить характер влияния интервала передискретизации Ωd на показатели variability сердечного ритма и обосновать выбор Ωd .

Формирование ритмограммы

Анализ variability сердечного ритма начинают с формирования исходных данных из кардиосигнала путем выделения R-зубцов и расстояния между ними, называемые RR-интервалами. Такая последовательность RR-интервалов (или отсчетов) формирует тахограмму, где по оси абсцисс откладываются номера RR-интервалов, а по оси ординат – их длительность (рис. 1).

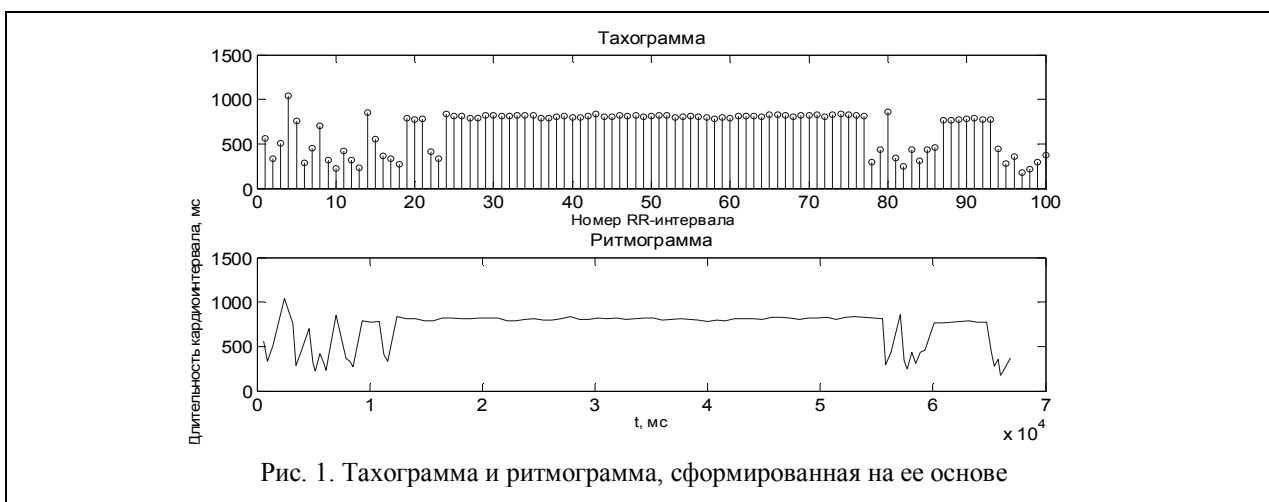


Рис. 1. Тахограмма и ритмограмма, сформированная на ее основе

Чтобы проанализировать тахограмму при помощи спектральных методов, необходимо выполнить её предварительную обработку, а именно представить сигнал как функцию времени (рис. 1). Полученный после такой обработки сигнал называется RR-ритмограммой и имеет неодинаковые интервалы

между соседними отсчетами. Однако для корректного выполнения спектрального анализа необходимо использовать равномерно распределенный сигнал во времени, а, следовательно, RR-ритмограмма требует дальнейшего преобразования путем передискретизации [2, 4, 7].

Назначение и виды передискретизации

Для корректной физиологической интерпретации ВСП крайне важно проводить предварительную обработку сигнала и соблюдать условия применения всех используемых методов анализа. Например, одно из условий спектрального анализа – использование сигнала с равномерной временной шкалой, а полученная из ЭКГ-сигнала RR-ритмограмма не удовлетворяет его, так как она не равномерно распределена во времени. Поэтому предварительная обработка RR-ритмограммы – главная процедура для выполнения спектрального анализа, заключающаяся в интерполяции и передискретизации для приведения сигнала к равномерной временной шкале [1, 2, 4, 7].

Дискретизация (sampling) – это разделение сигнала на равные отрезки с заданной частотой или интервалом. Передискретизация (англ. oversampling или gesampling) – изменение частоты дискретизации в произвольное (в том числе дробное) число раз [8]. В данной статье подразумевается цифровая передискретизация ритмограммы.

При передискретизации необходимо интерполировать амплитуду RR-ритмограммы, которую можно выполнить по методу ближайших соседей (NNR), кусочно-линейной функцией, кубическими сплайнами (Spline) или кусочными полиномами Эрмита (PCH).

Интервал передискретизации

Рассмотрим пример кусочно-линейной интерполяции, при помощи которой проводилась передискретизация в данном исследовании. Для реализации данной процедуры дискретные значения RR-интервалов, расположенных друг относительно друга на расстоянии последовательных RR-интервалов, принимаются за опорные точки. Но данная временная шкала не является равномерной, что, как отмечено выше, противоречит требованиям спектрально-

го анализа. Поэтому амплитуда сигнала, в котором по оси X просуммированные дискретные значения RR-интервалов (элементы задаются в масштабе реального времени) интерполируется с приведением к равномерному шагу (интервалу) передискретизации между отсчетами с выбранной частотой передискретизации $1/\Omega\delta$ (рис. 2).

Передискретизированные таким образом интервалы RR равномерно распределены во времени, что допускает использование спектрального анализа и их кросс-спектральных оценок [2].

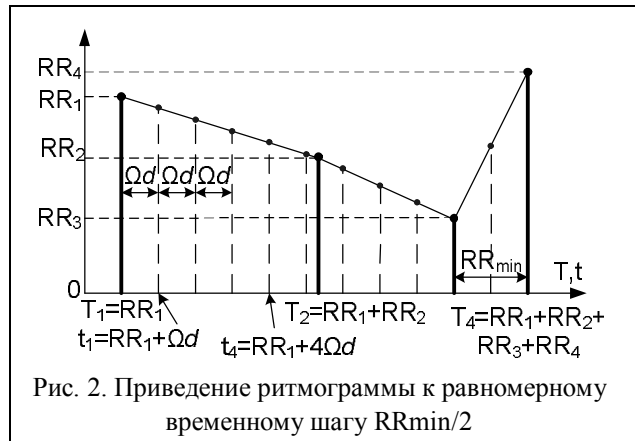


Рис. 2. Приведение ритмограммы к равномерному временному шагу $RR_{min}/2$

Результаты исследования

Нами сформированы и проанализированы 45 RR-ритмограмм, состоящих из 256, 999 отсчетов, а также 9-минутные записи ритмограммы, полученные в результате клинических обследований пациентов. Интервалы передискретизации выбирались по отношению к минимальному RR-интервалу (в табл. 1 и далее обозначается как RR_{min}) ритмограммы. Интервал передискретизации 500 мс выбран согласно рекомендациям [3], а $1/(170 \text{ Гц})$ получен нами в ходе исследования. Интерполяция проводилась кусочно-линейными функциями. Расчеты были сделаны с помощью следующего программного обеспечения: Microsoft Office Excel 2010 и MATLAB R2012a.

Таблица 1

Анализируемые интервалы передискретизации

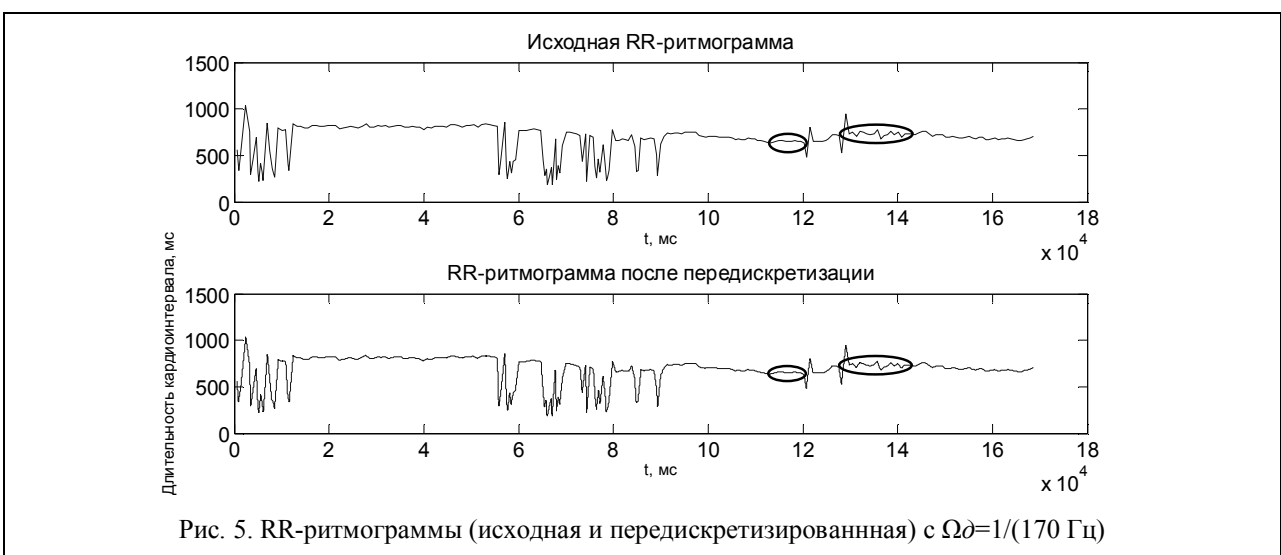
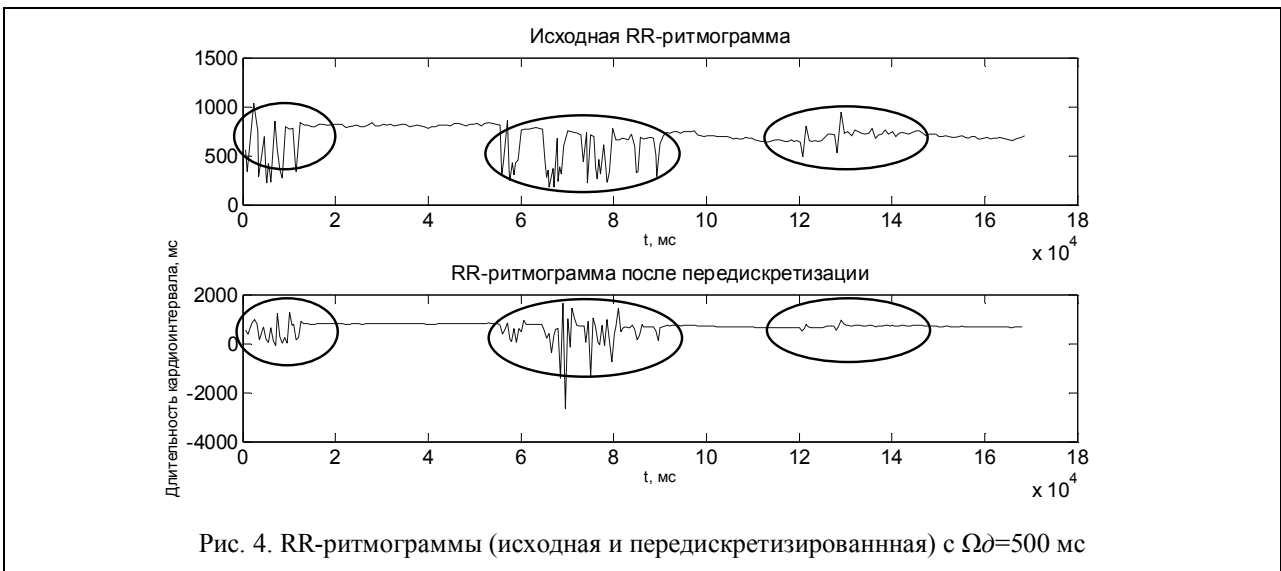
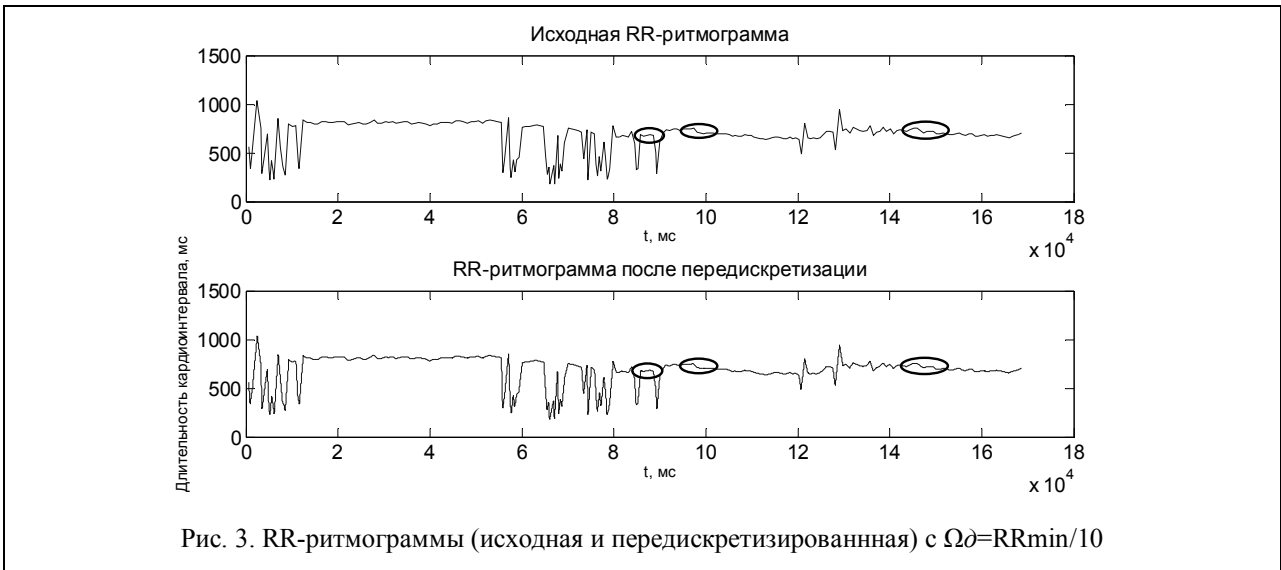
RRmin
RRmin/2
RRmin/3
RRmin/4
RRmin/5
RRmin/6
RRmin/7
RRmin/8
RRmin/9
RRmin/10
RRmin/11
RRmin/12
RRmin/13
RRmin/14
RRmin/15
RRmin/20
RRmin/25
RRmin/30
RRmin/50
RRmin/100
500 мс
1/(170 Гц)

Наиболее характерные RR-ритмограммы после передискретизации с выбранными интервалами представлены на рис. 3 – 5 (под каждым исходным сигналом снизу приведен передискретизированный). Так, на рис. 3 выделены области, которые не показывают видимых изменений в форме сигнала. Одна-

ко, при более детальном рассмотрении этих областей становится заметной существенная разница в амплитуде, что подтверждается большим значением ошибки передискретизации (при $\Omega\delta = RR_{min}/10$). Наиболее заметная разница между исходной тахограммой и передискретизированной (при $\Omega\delta=500 \text{ мс}$)

представлена на рис. 4 и свидетельствует о сильном искажении формы сигнала при его преобразовании. На основании сравнения исходных и передискретизиро-

ванных ритмограмм нами было найдено значение интервала передискретизации $\Omega\delta = 1/(170 \text{ Гц})$, при котором искажения сигнала минимальны (рис. 5).



Стандартные статистические показатели, которые рекомендованы рабочей группой Европейского Кардиологического Общества и Северо-Американского общества стимуляции и электрофизиологии в [9], вычисляются для тахограммы, поэтому интервал

$\Omega\delta$ не влияет на их значения. Наиболее чувствительными компонентами к $\Omega\delta$ являются спектральные составляющие (рис. 6, табл. 2).

Спектральный анализ проводился при помощи Фурье преобразования.

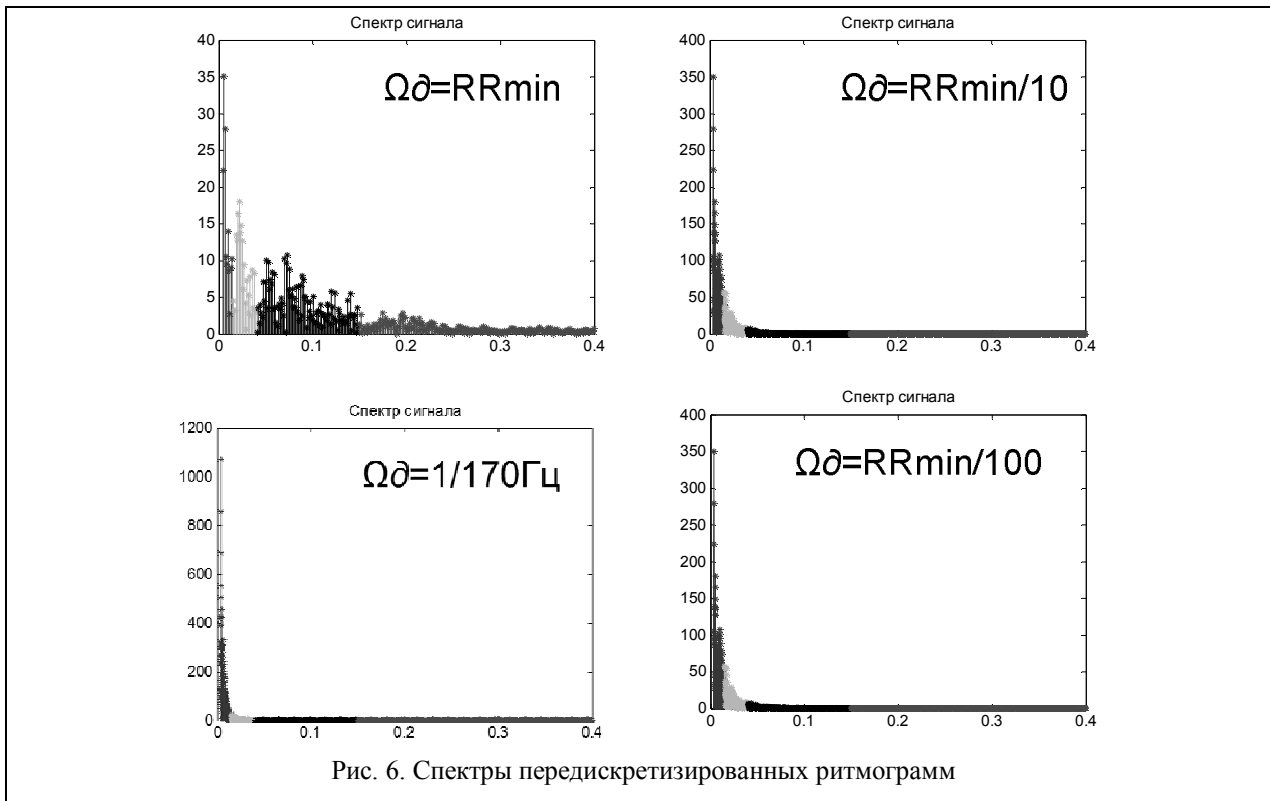


Рис. 6. Спектры передискретизированных ритмограмм

Таблица 2

Значения спектральных показателей, вычисленные для одного и того же сигнала при разных интервалах передискретизации $\Omega\delta$

$\Omega\delta$	Спектральные составляющие					
	ULF, мс ²	VLF, мс ²	LF, мс ²	HF, мс ²	Total Power, мс ²	LF/HF
RRmin	0,5346	0,0928	0,1854	0,1007	0,9135	1,842
RRmin/2	0,3599	0,0955	0,1333	0,0343	0,6231	3,881
RRmin/3	0,38	0,1202	0,1017	0,0207	0,6226	4,923
RRmin/4	0,3922	0,1371	0,0761	0,0165	0,6219	4,625
RRmin/5	0,4172	0,1264	0,0641	0,0139	0,6217	4,595
RRmin/6	0,4368	0,1222	0,0499	0,0126	0,6215	3,951
RRmin/7	0,4581	0,1086	0,0429	0,0116	0,6211	3,691
RRmin/8	0,475	0,0967	0,0383	0,0108	0,6208	3,553
RRmin/9	0,4843	0,0912	0,0348	0,0103	0,6205	3,375
RRmin/10	0,4947	0,0861	0,0298	0,0098	0,6204	3,025
RRmin/11	0,5056	0,0787	0,0263	0,0097	0,6202	2,717
RRmin/12	0,5147	0,071	0,0247	0,0095	0,6199	2,593
RRmin/13	0,5206	0,0674	0,0224	0,0093	0,6198	2,399
RRmin/14	0,5232	0,0656	0,0217	0,0093	0,6196	2,341
RRmin/15	0,5285	0,0611	0,0206	0,0092	0,6195	2,246
RRmin/50	0,5799	0,017	0,0117	0,0086	0,6172	1,367
RRmin/100	0,5853	0,0112	0,0109	0,0085	0,6159	1,28
1/(170 Гц)	0,5809	0,008	0,0098	0,0078	0,6066	1,253

Ошибка передискретизации

При сравнении исходных и передискретизированных RR-ритмограмм наблюдается разница по форме и амплитуде, поэтому нами была проведена количественная оценка результатов передискретизации и рассчитаны корреляционные отношения между спектральными составляющими, ошибкой интерполяции и интегральным показателем активности регуляторных систем по Р.М. Баевскому (ПАРС), который включает спектральные показатели "Медленные волны 1го порядка" и "Медленные

волны 2го порядка". Для каждого интервала передискретизации рассчитана суммарная ошибка интерполяции $\delta = \sum \delta_i$.

На рис. 7 показано, что ошибка интерполяции δ_i вычисляется как разница между фактической амплитудой отсчета (сплошная линия RR) и его интерполированным значением (обозначено "rr"):

$$\delta_i = RR_i - rr_i.$$

Передискретизированный фрагмент RR-ритмограммы изображен пунктирной линией.

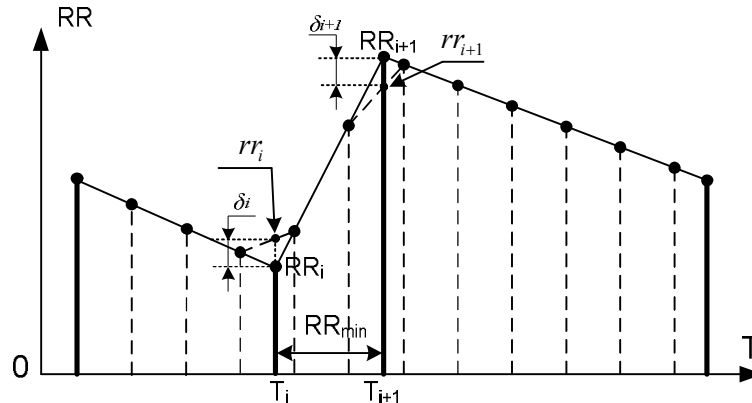


Рис. 7. Невязка при кусочно-линейной интерполяции

Значение относительной величины δ усреднили для всех 45 сигналов для каждого $\Omega\delta$ в отдельности. Для удобства визуального восприятия нами построена графическая зависимость относительной ошибки интерполяции от порядкового номера интервала передискретизации:

- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 1-й $\Omega\delta = RR_{min}$, | 2-й $\Omega\delta = RR_{min}/2$, |
| 3-й $\Omega\delta = RR_{min}/3$, | 4-й $\Omega\delta = RR_{min}/4$, |
| 5-й $\Omega\delta = RR_{min}/5$, | 6-й $\Omega\delta = RR_{min}/6$, |
| 7-й $\Omega\delta = RR_{min}/7$, | 8-й $\Omega\delta = RR_{min}/8$, |
| 9-й $\Omega\delta = RR_{min}/9$, | 10-й $\Omega\delta = RR_{min}/10$, |
| 11-й $\Omega\delta = RR_{min}/11$, | 12-й $\Omega\delta = RR_{min}/12$, |
| 13-й $\Omega\delta = RR_{min}/13$, | 14-й $\Omega\delta = RR_{min}/14$, |
| 15-й $\Omega\delta = RR_{min}/15$, | 16-й $\Omega\delta = RR_{min}/20$, |
| 17-й $\Omega\delta = RR_{min}/25$, | 18-й $\Omega\delta = RR_{min}/30$, |
| 19-й $\Omega\delta = RR_{min}/50$, | 20-й $\Omega\delta = RR_{min}/100$. |

Как видно из верхнего графика рис. 8, при интервалах передискретизации $RR_{min} - RR_{min}/4$ ошибка интерполяции резко убывает, а при дальнейшем уменьшении $\Omega\delta$ асимптотически стремится к нулю.

Чтобы выбрать интервал передискретизации, достаточно найти точку перегиба кривой. Для этого нами выполнена полиномиальная, степенная, экспоненциальная и логарифмическая аппроксимации ошибки как функции порядкового номера интервала передискретизации. На рис. 8 показан график зависимости ошибки от порядкового номера интервала

передискретизации, вторая производная которого имеет несколько точек перегиба (указаны стрелками).

Вид аппроксимирующей функции сильно влияет на искомую точку: вторая производная степенной функции стремится к нулю, начиная с точки под номером 5, логарифмическая — ближе к 12, и экспоненциальная — в точке 16 (рис. 9). Из этого можно сделать вывод, что первые пять интервалов нужно исключить, так как ошибка, возникающая при данных $\Omega\delta$, имеет слишком большое значение, что приводит к искажению сигнала, и вызывает сомнения при последующем анализе.

Так как кривые зависимостей на всех 4-х графиках стремятся к нулю ближе к точке 16, которая лежит в пределах $\Omega\delta = RR_{min}/50$ и $RR_{min}/100$, то, следовательно, целесообразно исследовать этот промежуток более детально.

Нами были вычислены спектральные показатели для ритмограмм, передискретизированных с интервалами $= RR_{min}/50$ и $RR_{min}/100$ и построена корреляционная матрица для выявления связи между ошибкой передискретизации δ , спектральными составляющими, и ПАРС для $\Omega\delta = RR_{min}/50$ и $RR_{min}/100$ (табл. 3).

Ячейки, содержащие коэффициент корреляции больше 0,7, свидетельствуют о сильной корреляционной связи (выделены).

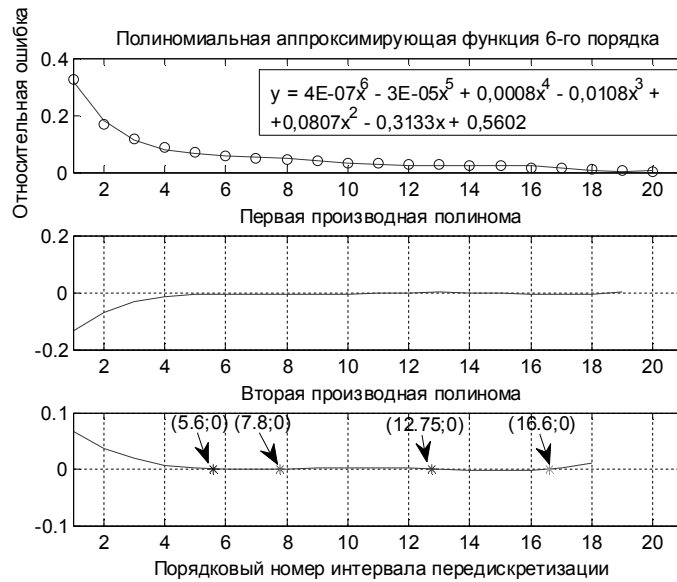


Рис. 8. Зависимость ошибки от интервала передискретизации, представленная полиномиальной функцией 6-го порядка, ее первой и второй производными

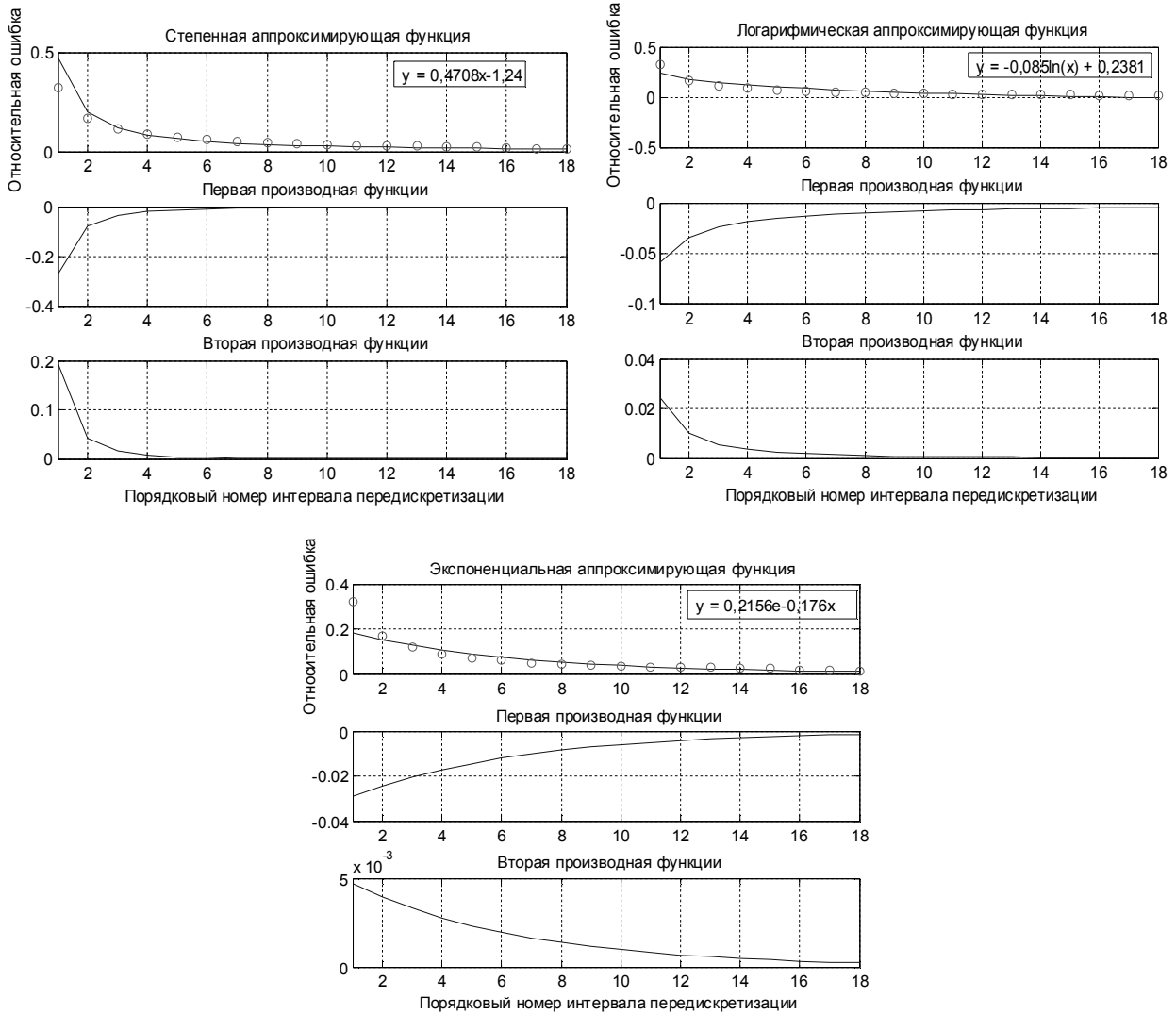


Рис. 9. Зависимость ошибки от интервала передискретизации. Степенная, логарифмическая и экспоненциальная функции и их производные

Таблица 3

Корреляционная матрица показателей

Параметр	$\Omega\delta$	ULF		VLF		LF		HF		Total Power		δ		ПАРС	
		RRmin/50	RRmin/100	RRmin/50	RRmin/100	RRmin/50	RRmin/100	RRmin/50	RRmin/100	RRmin/50	RRmin/100	RRmin/50	RRmin/100	RRmin/50	RRmin/100
ULF	RRmin/50	1													
	RRmin/100	0,9997	1												
VLF	RRmin/50	-0,44	-0,46	1											
	RRmin/100	-0,64	-0,66	0,90	1										
LF	RRmin/50	-0,28	-0,30	0,96	0,75	1									
	RRmin/100	-0,36	-0,37	0,99	0,83	0,99	1								
HF	RRmin/50	-0,24	-0,25	0,94	0,72	1,00	0,98	1							
	RRmin/100	-0,25	-0,27	0,95	0,73	1,00	0,99	0,9998	1						
Total Power	RRmin/50	0,98	0,98	-0,28	-0,53	-0,11	-0,19	-0,07	-0,08	1					
	RRmin/100	0,99	0,99	-0,34	-0,57	-0,18	-0,25	-0,13	-0,14	0,998	1				
δ	RRmin/50	-0,70	-0,70	0,18	0,44	-0,04	0,06	-0,10	-0,08	-0,73	-0,72	1			
	RRmin/100	-0,70	-0,70	0,18	0,44	-0,04	0,06	-0,10	-0,08	-0,73	-0,72	1	1		
ПАРС	RRmin/50	0,32	0,33	-0,37	-0,46	-0,26	-0,31	-0,22	-0,23	0,28	0,30	-0,29	-0,29	1	
	RRmin/100	0,32	0,33	-0,37	-0,46	-0,26	-0,31	-0,22	-0,23	0,28	0,30	-0,29	-0,29	1	1

Интересно, что частота передискретизации уже настолько большая, что не влияет на значения ПАРС и ошибку передискретизации. Однако, спектральные показатели показывают высокую чувствительность к значению $\Omega\delta$.

Таким образом, интервал передискретизации следует искать в пределах

$$RRmin/50 - RRmin/100.$$

Нами были рассчитаны показатели размерности ритмограммы: число отсчетов и их процентное соотношение при $\Omega\delta = RRmin/50$, $RRmin/100$ и $1/(170 \text{ Гц})$ (приведено в табл. 4).

Когда интервал передискретизации является "плавающим", т.е. привязанным к $RRmin$ анализируемого сигнала, наблюдается большой разброс в размерности ритмограммы. Поэтому решающим фактором в выборе $\Omega\delta$ оказывается ошибка передискретизации, которая показывает минимальные значения при $\Omega\delta = 1/(170 \text{ Гц})$ (выделено).

Исходя из последних соображений, можно сделать вывод, что наиболее корректным интервалом передискретизации является $\Omega\delta = 1/(170 \text{ Гц})$, так как ошибка, возникающая после интерполяции с данным $\Omega\delta$ имеет наименьшее значение.

Таблица 4

Зависимость величины δ от N

Количество отсчетов N	$\Omega\delta = 1/(170 \text{ Гц})$	97956	97317	83464	100830	99234	94215	99985	97970	93008	81776
	$\Omega\delta = RRmin/100$	71137	77991	77562	57361	63449	89823	266130	215036	89837	79906
Разница количества точек при: $f = 170 \text{ Гц}$ и $\Omega\delta = RRmin/100$, %		27	20	7	43	36	5	62	54	3	2
δ	$\Omega\delta = 1/(170 \text{ Гц})$	0,083	0,333	0,077	0,226	0,043	0,305	0,786	0,591	0,198	0,102
	$\Omega\delta = RRmin/100$	0,110	0,538	0,085	0,385	0,067	0,352	0,266	0,099	0,179	0,075
	$\Omega\delta = RRmin/50$	0,221	1,055	0,161	0,811	0,137	0,574	0,455	0,138	0,359	0,170

Выводы

В данной работе было проанализировано 45 сигналов с 22 интервалами передискретизации, вследствие чего установлено следующее:

- при $\Omega_d = 500$ мс происходит значительная потеря информации, что искажает сигнал, а следовательно, результаты анализа кардиоритмограммы не могут быть использованы для дальнейшего анализа;

- построена корреляционная матрица, которая позволила обнаружить обратно пропорциональную связь ошибки, ULF и общей мощностью спектра, что в целом не влияет на ПАРС;

- проанализирована зависимость ошибки передискретизации от интервала передискретизации, в результате которой определен целевой диапазон поиска значений, полученный путем вычисления точек перегиба (вторая производная полиномиальной аппроксимирующей функции):

$$\Omega_d = RR_{\min}/50 \text{ и } RR_{\min}/100.$$

Таким образом, нами установлен характер влияния выбранного интервала передискретизации на тахограмму и ее спектральные характеристики и обоснован интервал передискретизации

$$\Omega_d = 1/(170 \text{ Гц}).$$

Список литературы

1. Kim Ko Keun. *The effect of missing RR-interval data on heart rate variability analysis in the frequency domain* [Text] / Ko Keun Kim, Jung Soo Kim, Yong Gyu Lim, Kwang Suk Park // *IOP Publishing physiological measurement*. – 2009. – №30. – P. 1039-1050.
2. Singh D. *Sampling frequency of the RR interval time series for spectral analysis of heart rate variability* [Text] / D. Singh, K. Vinod, S. C. Saxena // *Journal of Medical Engineering & Technology*. – 2004. – Vol. 28, No. 6. – P. 263-272.
3. Moody George B. *Spectral Analysis of Heart Rate Without Resampling* [Text] / George B. Moody // *Harvard*

M.I.T. Division of Health Sciences and Technology, Cambridge. – 1993. – P. 715-718.

4. Clifford Gari D. *Quantifying Errors in Spectral Estimates of HRV Due to Beat Replacement and Resampling* [Text] / Clifford Gari D., Lionel Tarassenko // *IEEE Transactions on biomedical engineering*. – 2005. – Vol. 52, No. 4. – P. 630-638.

5. Laguna Pablo. *Power Spectral Density of Unevenly Sampled Data by Least-Square Analysis: Performance and Application to Heart Rate Signals* [Text] / Pablo Laguna, George B. Moody, Roger G. Mark // *IEEE Transactions on biomedical engineering*. – 2005. – Vol. 45, No. 6. – P. 698-715.

6. Kim Ko Keun. *The effect of missing RR-interval data on heart rate variability analysis in the frequency domain*. [Text] / Ko Keun Kim, Jung Soo Kim, Yong Gyu Lim, Kwang Suk Park // *IOP Publishing physiological measurement Physiol. Meas.* – 2009. – №30. – P. 1039-1050.

7. Singh D. *Sampling frequency of the RR interval time series for spectral analysis of heart rate variability*. [Text] / D. Singh, K. Vinod, S. C. Saxena // *Journal of Medical Engineering & Technology*. – 2004. – Vol. 28, No. 6. – P. 263-272.

8. Матвеев Ю.Н. *Цифровая обработка сигналов* [Текст] / Ю.Н. Матвеев, К.К. Симончик, А.Ю. Тропченко, М.В. Хитров. – СПб.: СПбНИУ ИТМО, 2013. – 166 с.

9. Malik Marek. *Вариабельность сердечного ритма. Стандарты измерения, физиологической интерпретации и клинического использования, разработанные рабочей группой Европейской Ассоциацией Кардиологии и Северо-Американской Ассоциацией Электрофизиологии и Кардиостимуляции* [Текст] / Marek Malik, J. Thomas Bigger, A. John Camm, Robert E. Kleiger, Alberto Malliani, Arthur J. Moss, Peter J. Schwartz. под. общ. ред. Marek Malik – *Европейский Кардиологический журнал*. – 1996. – №3. – С. 354-381.

Поступила в редколлегию 20.10.2014

Рецензент: д-р техн. наук, доц. И.В. Прасол, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

ПЕРЕДИСКРЕТИЗАЦІЯ ТАХОГРАМИ. ПРОБЛЕМА ВИБОРУ ІНТЕРВАЛУ ПЕРЕДИСКРЕТИЗАЦІЇ

О.М. Величко, О.Е. Гапон

Спектральна оцінка варіабельності серцевого ритму часто включає в себе використання швидкого перетворення Фур'є, одним із умов якого є рівномірно розподілені в часі вихідні дані. Їх отримують шляхом передискретизації (різноманітні методи інтерполяції). Але залишається невирішеним питання про те, який інтервал передискретизації застосувати, щоб мінімізувати похибку інтерполяції.

Ключові слова: варіабельність серцевого ритму, RR-інтервал, тахограма, ритмограма, передискретизація, інтервал передискретизації, спектральний аналіз, частотні складові.

TACHOGRAM RESAMPLING. THE PROBLEM OF CHOOSING RESAMPLING INTERVAL

O.N. Velichko, O.E. Gapon

Spectral estimate of the heart rate variability often involves using the fast Fourier transform that requires evenly sampled time series. They are gotten by resampling (various methods of resampling are usually employed). But it's not clear what resampling interval we must use to minimize the mistake that appears after interpolation.

Keywords: heart rate variability, RR-interval, tachogram, ritmogram, resampling, resampling interval, spectral analysis, frequency components.