

УДК 615.471:617.7

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ЭКГ НА ТОЧНОСТЬ ВЫЧИСЛЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВАРИАбельНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

А. Н. Калинин,

канд. техн. наук, доцент

О. Д. Юрьева,

аспирант

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Представлены результаты экспериментальной оценки зависимости ошибки вычисления спектральных параметров variability сердечного ритма от частоты дискретизации при использовании трех различных методов определения опорной точки QRS-комплекса: по абсолютному максимуму, по равенству площадей под кривой и по равенству сумм квадратов модулей значений кривой, описывающей QRS-комплекс.

Введение

Анализ variability сердечного ритма (ВСР) представляет собой один из наиболее распространенных методов количественной оценки активности вегетативной нервной системы. Метод основан на распознавании и измерении временных интервалов между R-зубцами ЭКГ (RR-интервалов), построении динамических рядов кардиоинтервалов и последующем анализе полученных числовых рядов математическими методами.

Первым шагом при анализе ритма всегда является измерение RR-интервала. Оценка значений RR-интервалов по дискретизованному сигналу ЭКГ приводит к появлению ошибки, связанной с конечностью величины шага дискретизации. Низкая частота дискретизации (ЧД) может привести к неточному определению опорной точки R-зубца, что существенно изменяет измеряемые спектральные показатели ВСР. Международными стандартами измерения ВСР [1] рекомендован диапазон выбора ЧД от 250 до 500 Гц. Более низкая ЧД может дать удовлетворительные результаты только в случае, если используется какой-либо алгоритм интерполяции (например, параболический) для более точного определения опорной точки R-зубца [2].

Выбор ЧД зависит от диапазона частот ЭКГ, от конечных целей исследования и от используемого метода анализа. Выбор ЧД определяется тем, что спектральная плотность мощности ЭКГ находится в диапазоне частот 0,5–30 Гц [3]. Согласно теореме Котельникова, достаточна частота дискрети-

зации, равная 100 Гц. Однако Американское общество кардиологов рекомендует использовать ЧД 500 Гц. Кроме того, в последнее время появляется все больше статей, приводящих доказательства необходимости использования ЧД, равной 1 кГц [2]. Это связано с тем, что при невысокой variability относительная ошибка вычисления спектральных параметров ВСР оказывается достаточно большой [4].

Для вычисления значения ВСР предложено много разнообразных методов, основанных на различных подходах к анализу сигналов. В частности, методы статистического анализа, спектральный анализ, методы нелинейной динамики, корреляционные методы. В данной работе представлены результаты исследования с использованием методов спектрального анализа.

Анализ спектральной плотности мощности позволяет получить базовую информацию о том, как распределена мощность в зависимости от частоты. В спектре различают три основные спектральные компоненты [1]: VLF (very low frequency, 0,0003–0,04 Гц), LF (low frequency, 0,04–0,15 Гц), HF (high frequency, 0,15–0,4 Гц).

Целью исследования, представленного в настоящей работе, являлась сравнительная оценка различных подходов к определению опорной точки QRS-комплекса — по максимуму и «центру тяжести». Проводилась количественная оценка ошибки вычисления параметров ВСР в зависимости от выбранного значения ЧД и алгоритма определения опорной точки QRS-комплекса с целью обоснования выбора ЧД.

Исследование проводилось на модельном сигнале и реальных записях ЭКГ. Зубцы ЭКГ моделировались фрагментами синусоид.

Для проведения исследования был сформирован набор реальных записей ЭКГ в трех отведениях. Для автоматического анализа проведена верификация данных с целью определения местоположения QRS-комплексов. Общее число записей — 10. Общее число QRS-комплексов — 3210. Длительность модельного сигнала и каждой записи — 5 мин. Исходная частота дискретизации модельного сигнала и реальных записей — 500 Гц. Все расчеты выполнялись с использованием пакета MATLAB.

Определение опорной точки по максимуму QRS-комплекса

При прореживании сигнала может происходить смещение точки максимума, что в свою очередь приводит к появлению ошибки в определении опорной точки и, соответственно, к неверному измерению RR-интервалов. Из примера (рис. 1) видно, что прореживание сигнала приводит к появлению ошибки.

Вычисление номера отсчета, соответствующего максимальному значению QRS-комплекса, выполнялось по формуле

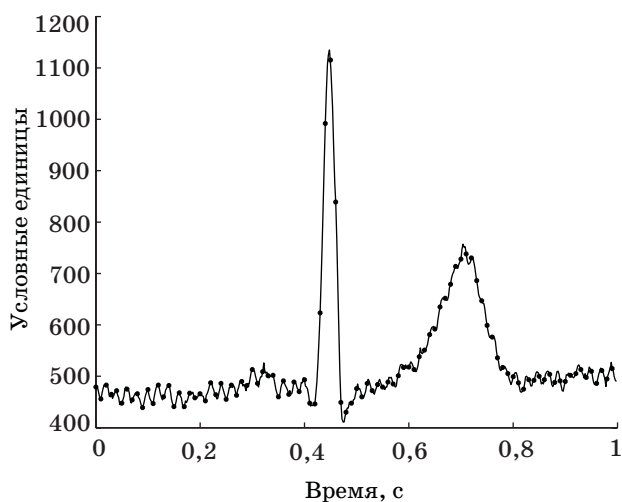
$$k_i = T_{\max i} F_d,$$

где $T_{\max i}$ — время, соответствующее максимуму QRS-комплекса; F_d — частота дискретизации.

Длительность RR-интервалов определялась по формуле

$$RR_i = (k_i - k_{i-1})T,$$

где T — интервал дискретизации.



■ Рис. 1. Отсчеты исходного сигнала и сигнала, прореженного в 5 раз (показаны жирными точками)

Расчет среднеквадратической ошибки определения опорной точки QRS-комплекса выполнялся по следующей формуле:

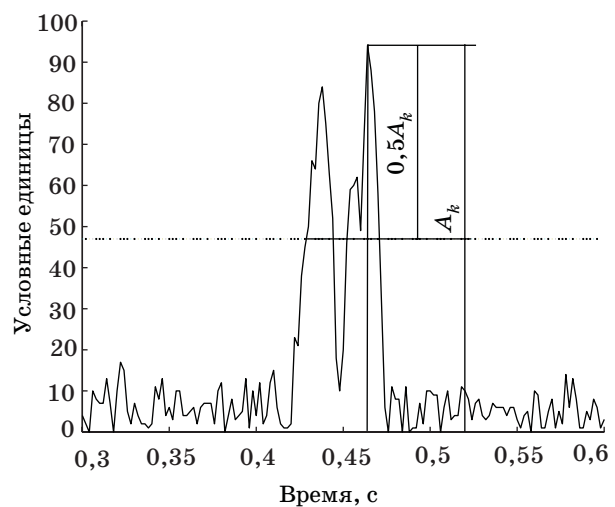
$$SQ = \frac{\sum_{i=1}^N (RR_{0i} - RR_{pi})^2}{N - 1},$$

где RR_0 и RR_p — длительность RR-интервала исходного и прореженного сигнала соответственно (p — коэффициент прореживания); N — количество QRS-комплексов.

Определение опорной точки по «центру тяжести» QRS-комплекса

На первом этапе для удаления постоянной составляющей сигнала вычисляется модуль первой производной сигнала. Далее, для того чтобы устранить влияние колебаний, вызванных помехами, устанавливается некоторый порог, равный произведению коэффициента k (где $k < 1$) на максимальное значение QRS-комплекса. Опорная точка определяется двумя методами: по равенству площадей под кривой, описывающей анализируемый QRS-комплекс и ограниченной снизу порогом, и по равенству сумм квадратов модулей значений для той же кривой. На рис. 2 проиллюстрирована работа алгоритма определения опорной точки QRS-комплекса по «центру тяжести». На первом этапе работы алгоритма определяется предварительная опорная точка I_{ak} , соответствующая максимуму QRS-комплекса, а затем в соответствии с формулами, указанными ниже, определяется опорная точка I_k .

Расчет площади под кривой выполнялся по следующей формуле:



■ Рис. 2. Иллюстрация работы алгоритма определения опорной точки QRS-комплекса по «центру тяжести»

$$Q_k = \sum_{I_{lk}}^{I_{rk}} q_i,$$

где $q_i = \begin{cases} 0, & x_i \leq 0,5A_k \\ x_i - 0,5A_k, & x_i > 0,5A_k \end{cases}$, A_k — максимум

QRS-комплекса; I_{rk} и I_{lk} — соответственно правая и левая границы анализируемого участка. На предыдущих этапах работы было показано, что точность определения опорной точки QRS-комплекса зависит от значения порога [5]. Проведенные исследования позволили утверждать, что порог $0,5A_k$ является оптимальным.

За опорную точку k -го комплекса принимается первый отсчет I_k , для которого выполняется условие:

$$\sum_{I_{lk}}^{I_k} q_i \geq \frac{1}{2} Q_k \text{ — для метода определения опорной}$$

точки по равенству площадей;

$$\sum_{I_{lk}}^{I_k} |q_i|^2 \geq \frac{1}{2} Q_k \text{ — для метода определения опор-$$

ной точки по равенству сумм квадратов модулей значений кривой.

Методика эксперимента и результаты

В ходе эксперимента оценивалась ошибка, за которую принимался модуль разности между истинными значениями параметров ВСП и значениями параметров ВСП, измеренными для определенного коэффициента прореживания. В качестве истинных

■ Таблица 1

Параметры ВСП	Коэффициент прореживания k	Абсолютная ошибка $\times 10^3$, мс ² (модельный сигнал)	
		Равенство площадей	Равенство модулей
VLF	2	3,5	4,0
	3	3,5	4,4
	4	5,1	4,4
	5	5,7	4,5
LF	2	15,4	13,6
	3	16,9	18,1
	4	8,5	8,0
	5	7,9	3,8
HF	2	22,9	16,7
	3	56,1	24,5
	4	79,4	69,8
	5	87,5	77,4

■ Таблица 2

Параметры ВСП	Коэффициент прореживания k	Абсолютная ошибка $\times 10^{-2}$, мс ² (реальный сигнал)		
		Максимум	Равенство площадей	Равенство модулей
VLF	2	1,1	0,7	0,6
	3	1,3	1,2	0,7
	4	1,4	2,0	1,8
	5	1,4	2,3	1,4
LF	2	9,55	8,8	7,4
	3	11,4	12,0	9,5
	4	12,1	10,8	8,9
	5	12,5	11,7	7,4
HF	2	3,5	4,2	4,1
	3	4,4	4,6	5,4
	4	4,6	4,7	5,6
	5	4,7	4,6	5,2

значений параметров ВСП были выбраны значения ВСП, рассчитанные по результатам ручной верификации сигнала при максимальном значении ЧД. Вычислялась абсолютная ошибка при изменении коэффициентов прореживания от 2-х до 5.

На первом этапе исследования проводилась сравнительная оценка указанных выше методов определения опорной точки на модельном сигнале. Были исследованы зависимости величины абсолютной ошибки вычисления параметров HF, LF и VLF эталонного сигнала от коэффициента прореживания. Полученные результаты представлены в табл. 1.

На втором этапе проводилось аналогичное исследование на реальных записях ЭКГ. В табл. 2 показаны результаты исследования зависимости величины абсолютной ошибки вычисления параметров HF, LF и VLF реального сигнала от коэффициента прореживания для трех методов.

Анализ результатов и выводы

Проведенные эксперименты показали, что метод определения опорной точки по максимуму, который используется большинством исследователей, очень чувствителен к уменьшению ЧД. Для определения опорной точки могут служить альтернативные методы, основанные на «центре тяжести»: по равенству площадей под кривой и по равенству сумм квадратов модулей значений кривой. Второй из указанных алгоритмов является более устойчивым к снижению частоты и дает лучшие результаты. Кроме того, из табл. 2 видно, что при уменьшении ЧД в 2 раза существенно возрастает ошибка измерения параметров ВСП для всех трех алгоритмов. Таким образом, остается актуальной

задача дальнейшего исследования зависимости точности вычисления параметров ВСР от ЧД и создания единых рекомендаций по выбору ЧД.

На следующем этапе исследования планируется провести аналогичные исследования для дру-

гих способов определения опорной точки QRS-комплекса. Вероятно, наилучшими для определения опорной точки являются методы, основанные на интегральных характеристиках описания QRS-комплекса.

Литература

1. 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. N 93. P. 1043–1065.
2. Abboud S., Barnea O. Errors due to sampling frequency of the electrocardiogram in spectral analysis of heart rate signals with low variability // *Computers in Cardiology*. IEEE Press, 1995. P. 461–464.

3. Merri M. et al. Sampling frequency of the electrocardiogram for spectral analysis of the heart rate variability // *IEEE Transaction on Biomedical Engineering*. 1990. P. 99.
4. Ward S. et al. Electrocardiogram sampling frequency errors in PR-interval spectral analysis: Proc. IEEE PGBIOMED'04. Southampton, U.K., August 2004.
5. Юрьева О. Д. Исследование помехоустойчивости методов измерения длительности RR-интервалов // *Известия ГЭТУ*. В печати.

Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН
Отделение нанотехнологий и информационных технологий
Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН
Российский Национальный Комитет по автоматическому управлению
Научный совет по теории управляемых процессов и автоматизации
МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ «ТЕОРИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ»
с 26 по 30 января 2009 г.

Место проведения: институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН,
 адрес: 117997, ГСП-7, Россия, Москва, улица Профсоюзная, 65;
 институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН,
 адрес: 119526, Москва, просп. Вернадского, 101, корп. 1.

Мультиконференция «Теория и системы управления» объединяет четыре конференции

IV Международная конференция по проблемам управления (МКПУ-IV)

URL: <http://www.ipu.ru>
 E-mail: iccpripu@ipu.ru
 Тел./ факс: +7 (495) 334-89-69

Направления работы

Общие вопросы современной теории управления
 Устойчивость, робастность, инвариантность, адаптация в управляемых динамических системах
 Управление в междисциплинарных моделях социально-экономических и медико-биологических систем
 Управление в организационных системах
 Управление в промышленности, энергетике и на транспорте
 Управление в гибридных и других сложных моделях динамических и интеллектуальных систем; групповое управление и мультиагентные системы
 Информационные технологии в управлении; управление в вычислительных и телекоммуникационных системах
 Управление подвижными объектами
 Профессиональная подготовка специалистов в области управления

«Управление динамическими системами»

URL: <http://www.ipmnet.ru>
 E-mail: kostin@ipmnet.ru
 Тел.: +7 (495) 434-92-63; факс: +7 (499) 739-95-31

Направления работы

Теория управления динамическими системами
 Оптимальное управление
 Управление и оценивание в условиях неопределенности
 Игровые задачи динамики
 Управление летательными аппаратами и транспортными средствами
 Управление в робототехнике и мехатронике, включая микро- и наномеханические системы

«Математическая теория систем»

URL: <http://www.isa.ru>
 E-mail: znat@isa.ru
 Тел./ факс: +7 (499) 135-51-64

Направления работы

Математические методы теории систем
 Проблемы неопределенности и риски в теории систем
 Самоорганизация в сложных системах
 Методы и алгоритмы принятия решений
 Нелинейные управляемые системы
 Статистические методы в теории систем
 Теория макросистем
 Динамические системы, использующие экспертные знания
 Математическое моделирование сложных систем

VIII Международная конференция «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO'09) — см. с. 8 данного издания.