

АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ОШИБКИ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ТАХОГРАММЫ

Введение

Наиболее информативным неинвазивным методом количественной оценки вегетативной регуляции сердечного ритма признано определение variability сердечного ритма (ВСР). Многие зарубежные исследователи [1 – 7] изучают влияние используемых методов предварительной обработки тахограммы (передискретизации) на ее спектральную оценку. Но на данный момент не изучен вопрос влияния интервала передискретизации $\Omega\delta$ и ошибки интерполяции δ на ряд показателей, которые используются при анализе спектра и учитываются далее при расчете интегральных характеристик ВСР.

В статье приведен алгоритм расчета ошибки интерполяции δ .

Постановка задачи

Анализ variability сердечного ритма начинается 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).

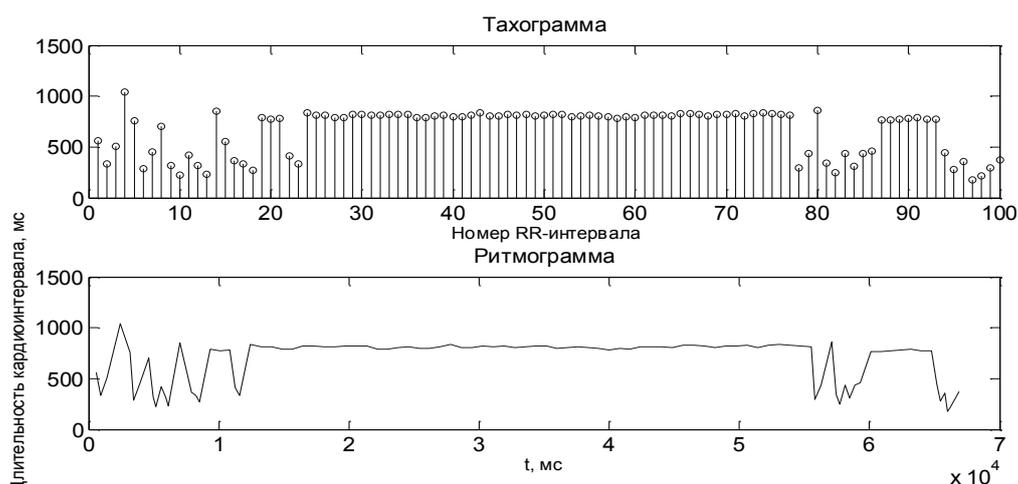


Рис.1. Тахограмма и ритмограмма, сформированная на ее основе

Чтобы проанализировать тахограмму при помощи спектральных методов, необходимо выполнить ее предварительную обработку, а именно: представить сигнал как функцию времени (рис.1). Его называют RR-ритмограммой и он 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]. 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).

После передискретизации сигнал искажается на величину ошибки интерполяции, которая отличается при разных интервалах передискретизации. А для получения наиболее правдоподобных результатов анализа ВСР необходимо учитывать эту величину и минимизировать ее влияние.

Спектральная оценка тахограммы изучается многими исследователями [1 – 7]. Разработаны новые методы получения спектра сигнала [8]. Но на данный момент наиболее распространенным методом спектрального анализа ВСП является преобразование Фурье, которое требует использовать передискретизированный сигнал. Поэтому важно исследовать влияние ошибки интерполяции, возникающей после передискретизации. В литературе работы на эту тему отсутствуют.

Алгоритм передискретизации ритмограммы кусочно-линейной функцией

Процесс формирования тахограммы и ритмограммы обуславливает ее кусочно-линейный характер. Поэтому нами выбран именно данный тип интерполяции. Процесс передискретизации ритмограммы путем линейной интерполяции кусочно-линейной функцией начинается с ввода массива данных, состоящего из последовательности длительностей RR -интервалов в миллисекундах [9] и значения интервала передискретизации Ω_d (рис.2) [10].

Входной массив данных необходимо преобразовать в сигнал с временной шкалой. Для этого от нулевой отметки оси абсцисс откладывается момент времени T_1 , равный первому RR -интервалу и t_0 передискретизированного массива. В связи с последним предложением, первый цикл для переменных T и RR начинается со второго элемента, а последующие циклы продолжаются по всей длине входного сигнала. Эти переменные соответствуют моментам времени и амплитудам отсчетов преобразованного сигнала (рис.6). Таким образом, последовательность RR -интервалов выступает в роли «амплитуд сигнала», и по временной шкале эти «амплитуды» располагаются друг относительно друга на расстоянии последовательных RR -интервалов.

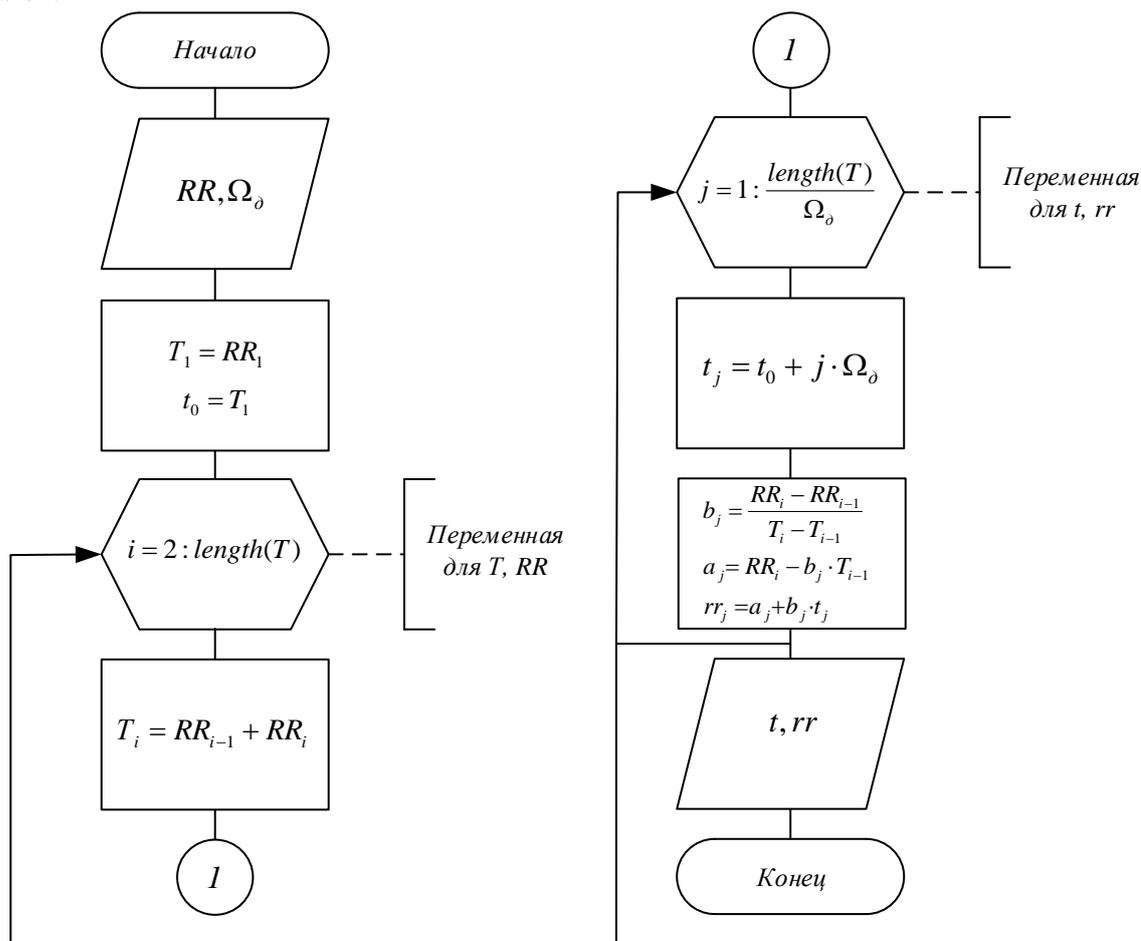


Рис. 2. Алгоритм передискретизации ритмограммы

Вычисление момента времени отсчета t и его амплитуды rr нового массива выполняется в цикле с шагом передискретизации $\Omega\delta$. Амплитуда каждого отсчета, находящегося между соседними исходными RR -интервалами, вычисляется согласно линейной зависимости $rr_j = a_j + b_j \cdot t_j$, где $a_j = RR_i - b_j \cdot T_{i-1}$, $b_j = \frac{RR_i - RR_{i-1}}{T_i - T_{i-1}}$. Линейная зависимость меняется для каждой пары соседних RR -интервалов исходной последовательности.

Алгоритм вычисления ошибки интерполяции

Передискретизация тахограммы вызывает искажение формы сигнала, степень которого зависит от интервала передискретизации $\Omega\delta$. Наиболее характерные RR -ритмограммы после передискретизации с разными интервалами представлены на рис.3 – 5 (под каждым исходным сигналом снизу приведен передискретизированный). Так, на рис. 2 выделены области, которые не показывают видимых изменений в форме сигнала. Однако 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 $\Omega\delta = 500$ мс) представлена на рис. 3 и свидетельствует о сильном искажении формы сигнала при его преобразовании.

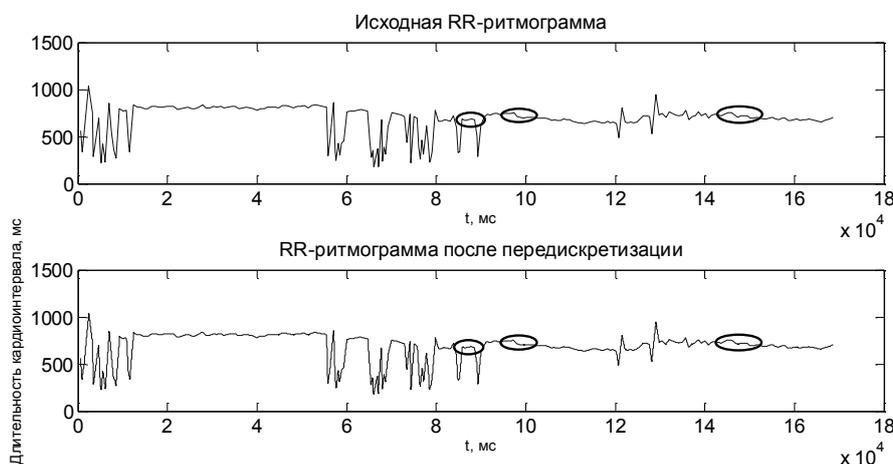


Рис.3. RR -ритмограммы (исходная и передискретизированная) с $\Omega\delta = RR_{min}/10$

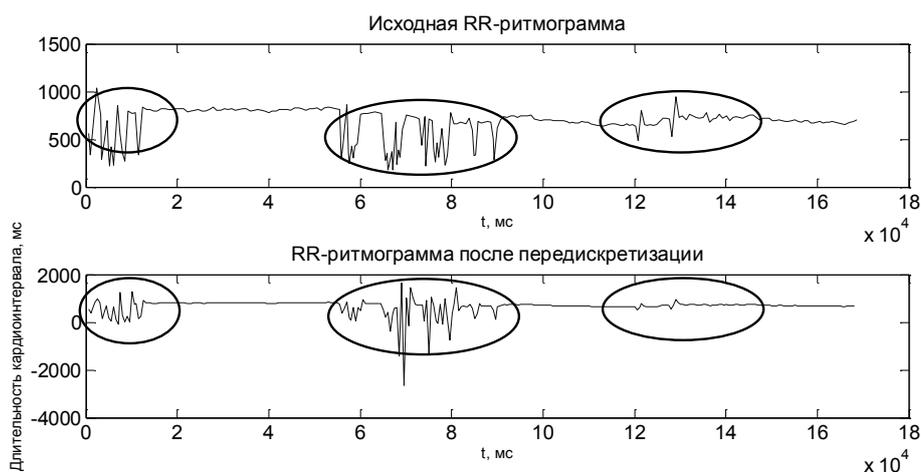


Рис. 4. RR -ритмограммы (исходная и передискретизированная) с $\Omega\delta = 500$ мс

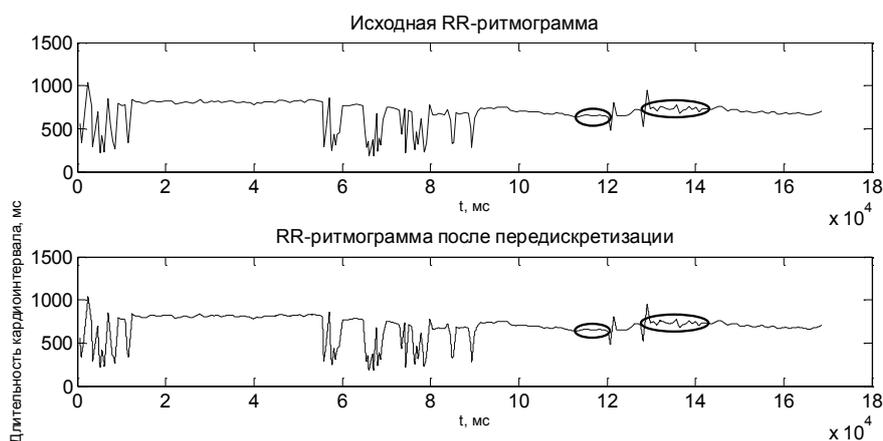


Рис. 5. RR-ритмограммы (исходная и передискретизированная) с $\Omega\delta=1/(170 \text{ Гц})$

Так как при сравнении исходных и передискретизированных RR -тахограмм наблюдается разница по форме и амплитуде, необходимо провести количественную оценку результатов передискретизации, а именно – рассчитать суммарную ошибку интерполяции $\delta = \sum \delta_i$. На рис.6 показано, что ошибка интерполяции δ_i в упрощенном виде вычисляется как разница между фактической амплитудой отсчета (сплошная линия RR) и его интерполированным значением (обозначено " RR_{δ} "):

$$\delta_i = RR_i - RR_{\delta_i} \quad (1)$$

Передискретизированный фрагмент RR -ритмограммы изображен пунктирной линией.

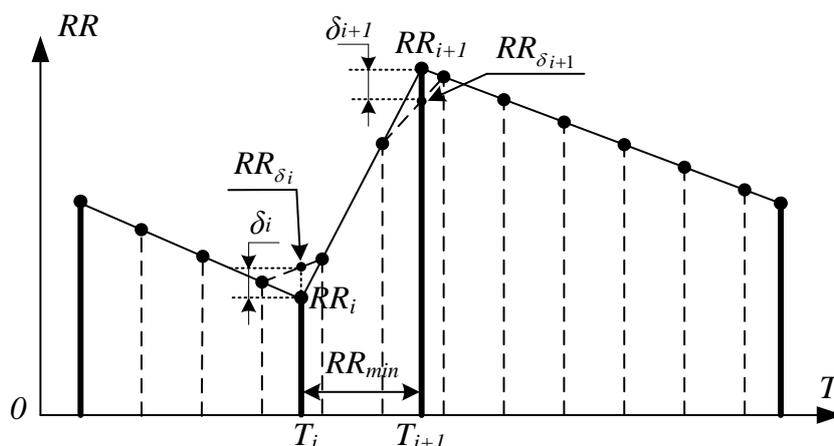


Рис. 6. Невязка при кусочно-линейной интерполяции

Алгоритм расчета абсолютной ошибки интерполяции приведен на рис.7. Для удобства мы ввели четыре переменные: a , b , c , d .

Алгоритм начинается с ввода массива данных, состоящего из амплитуды RR -интервалов и их последовательных моментов времени, в которые они появляются. Цикл начинается со второго элемента, так как первому элементу t_0 нового массива присваивается первое значение исходного массива T_1 . Для каждой пары временного ряда $[T_{i-1}; T_i]$ рассчитывается количество новых отсчетов n между ними, чтобы найти последний новый отсчет t_n , находящийся перед элементом массива t_i (рис.7). Оно рассчитывается по формуле $n = \frac{T_i - T_{i-1}}{\Omega\delta}$, где $\Omega\delta$ – интервал передискретизации.

Чтобы найти ошибку δ_i , необходимо установить, между какими отсчетами расположен основной RR -интервал T_i по формулам $t_n = t_0 + n \cdot \Omega\delta$, $t_{n+1} = t_n + \Omega\delta$ (рис.8). Далее находим

отсчеты в моменты времени t_n, t_{n+1} , находящиеся возле T_i . Их амплитуды вычисляем из уравнения линейной зависимости $rr_n = b_n t + a_n$, где $b_n = tg(T_i - T_{i-1}) / (t_n - t_{n-1})$, $a_n = y_n - kt_n$. Линейная зависимость меняется для каждого участка между исходными кардиоинтервалами. С помощью полученной зависимости вычисляется значение кардиоинтервала в момент времени t_n . Далее вычисляется значение следующего элемента массива t_{n+1} .

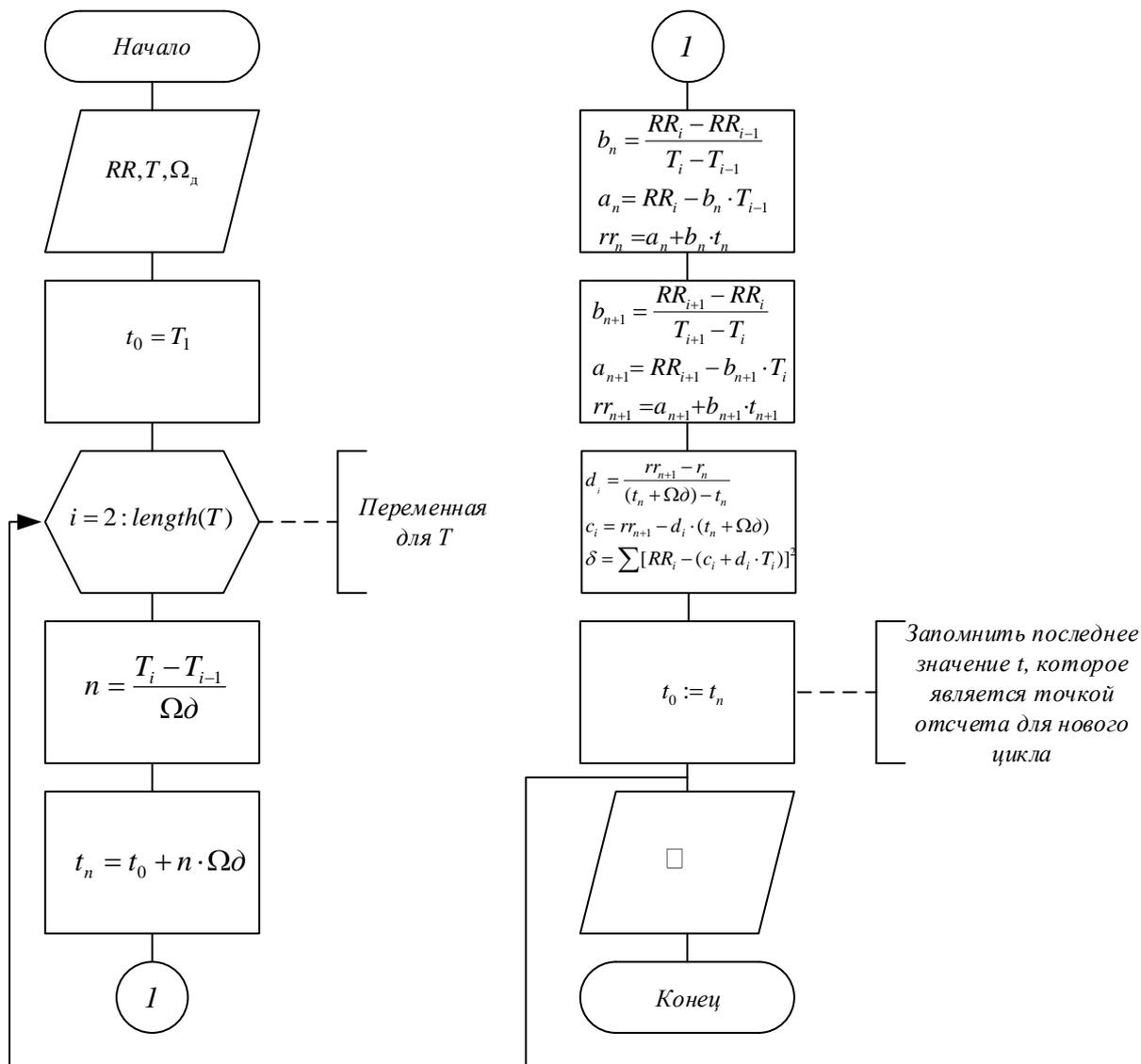


Рис. 7. Алгоритм вычисления ошибки интерполяции

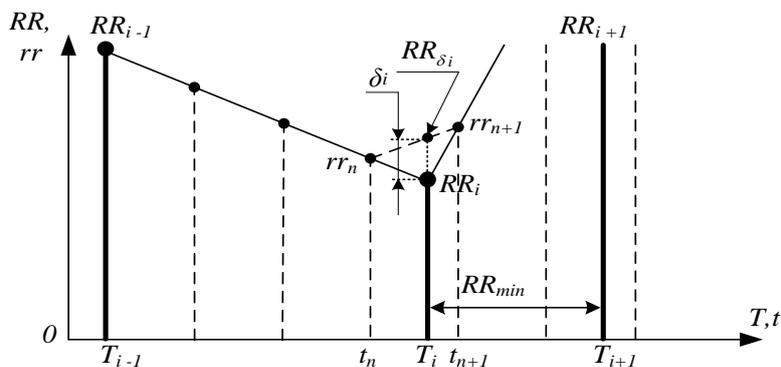


Рис. 8. Принцип вычисления ошибки интерполяции тахограммы δ_i

При помощи этих вычислений находим ошибку интерполяции δ_i как разность между амплитудой исходного кардиоинтервала RR и RR_δ , вычисленного по функции в момент времени T_i (рис. 8). Амплитуда δ_i вычисляется подобно расчету амплитуд новых отсчетов – при помощи уравнений линейных зависимостей $\delta_i = RR_i - (c_i + d_i \cdot T_i)$, где $d_i = \frac{rr_{n+1} - r_n}{t_{n+1} - t_n}$, $c_i = rr_{n+1} - d_i \cdot t_{n+1}$.

Момент времени t_n , соответствующий текущей ошибке, присваиваем переменной t_0 , т.к. поиск точек, в которых рассчитывается ошибка передискретизации, выполняется для каждого элемента массива T .

Конечная формула вычисления ошибки интерполяции тахограммы имеет вид

$$\delta = \sum [RR_i - (c_i + d_i \cdot T_i)]^2, \text{ где } d_i = \frac{rr_{n+1} - r_n}{t_{n+1} - t_n}, \text{ где } c_i = rr_{n+1} - d_i \cdot t_{n+1} \quad (2)$$

При помощи данного алгоритма было проанализировано 45 сигналов с 20 интервалами передискретизации и получена зависимость усредненной для всех сигналов относительной ошибки интерполяции δ_i от интервала передискретизации $\Omega\delta$ (рис.9), которая имеет прямо пропорциональную убывающую тенденцию. Интервалы передискретизации выбирались по отношению к минимальному RR-интервалу (обозначается как RRmin) тахограммы. Представленная зависимость наглядно показывает, что чем меньше интервал передискретизации, тем меньше ошибка интерполяции тахограммы и тем меньше искажения исходного сигнала. Это позволяет провести более достоверный анализ.

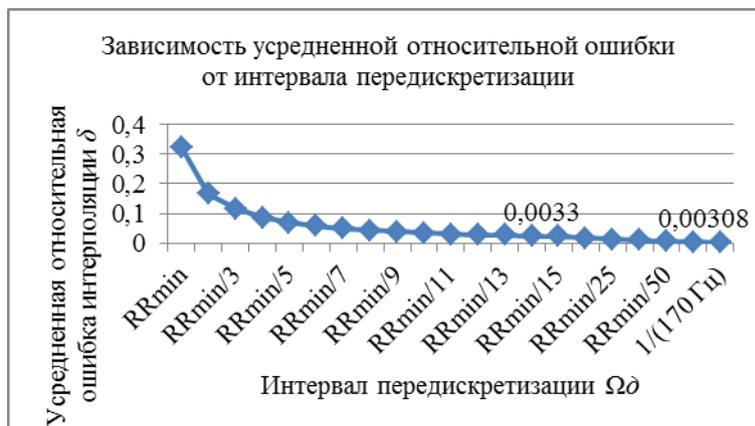


Рис. 9. Зависимость усредненной для всех сигналов относительной ошибки интерполяции δ_i от интервала передискретизации $\Omega\delta$

Таким образом, при помощи предложенного алгоритма расчета ошибки интерполяции δ_i можно определить степень влияния передискретизации на исходный сигнал и выбрать подходящий интервал передискретизации $\Omega\delta$, а именно $\Omega\delta = 1/(170 \text{ Гц})$, рекомендованный в [10], так как ошибка, возникающая после интерполяции с данным $\Omega\delta$, имеет наименьшее значение. Как видно из графика, усредненная относительная ошибка интерполяции δ_i для всех 45 сигналов при интервале передискретизации $\Omega\delta = RRmin/100$ равна 0,0033, а при $\Omega\delta = 1/(170 \text{ Гц}) \delta_i = 0,00308$.

Выводы

Предложены алгоритмы передискретизации и расчета ошибки интерполяции δ_i тахограммы, которые позволяют провести передискретизацию с минимальными искажениями исходного сигнала.

В результате анализа 45 сигналов с 20 интервалами передискретизации выявлена сильная корреляция интервала передискретизации тахограммы Ω и ошибки ее интерполяции δ_i в виде прямо пропорциональной зависимости. Это позволяет минимизировать искажения сигнала за счет подбора корректного Ω , равного $1/(170 \text{ Гц})$ для получения наиболее достоверного результата обработки тахограммы.

Список литературы: 1. *Kim, Ko Keun.* The effect of missing RR-interval data on heart rate variability analysis in the frequency domain / 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 / D. Singh, K. Vinod, S. C. Saxena // Journal of Medical Engineering & Technology. – 2004. – Volume 28, Number 6. – P. 263–272. 3. *Moody, George B.* Spectral Analysis of Heart Rate Without Resampling / 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 / 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 / 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 / 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. / D. Singh, K. Vinod, S. C. Saxena // Journal of Medical Engineering & Technology. – 2004. – Volume 28, Number 6. – P. 263–272. 8. *Moody, G.B.* Spectral Analysis of Heart Rate Without Resampling. / G.B. Moody // Computers in Cardiology. – 1993. – Proceedings. – P. 715 – 718. 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 / 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. 10. *Величко О.Н.* Передискретизация тахограммы. Проблема выбора интервала передискретизации. / О.Н. Величко, О.Е. Гапон // Системи обробки інформації. – 2014. – №9 (125). – С. 168 – 175.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 15.09.2014