

О. О. ЖАРИНОВ, И. О. ЖАРИНОВ

## СИНТЕЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА НА ОСНОВЕ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОГО МЕТОДА В ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Рассматриваются подходы к оптимизации вычислительных алгоритмов обработки электрокардиограмм на основе корреляционно-экстремального метода. Предложен алгоритм, позволяющий уменьшить время вычислений в десятки раз при сохранении показателей качества обработки сигнала с учетом требований электрокардиографии высокого разрешения.

*Ключевые слова:* электрокардиография высокого разрешения, QRS-комплекс, корреляционно-экстремальный метод, вычислительный алгоритм, быстрое преобразование Фурье, цифровая свертка.

**Введение.** Развитие метода электрокардиографии на современном этапе связано с совершенствованием технических средств регистрации электрокардиограммы (ЭКГ) и математических методов ее обработки. В электрокардиографии интенсивно развивается самостоятельное направление исследований — электрокардиография высокого разрешения (ЭКГ ВР) [1].

Одна из ключевых процедур автоматизированной обработки сигнала в ЭКГ ВР основана на применении ресурсоемкой, с вычислительной точки зрения, процедуры корреляционно-экстремальной обработки [2—4], которая позволяет решать задачи обнаружения и оценивания временного положения каждого кардиоцикла в реализации ЭКГ на фоне сопровождающих регистрацию помех. Практический опыт показывает, что при обработке ЭКГ, зарегистрированной с повышенной частотой дискретизации, вычислительная сложность корреляционно-экстремального метода существенно ограничивает возможности его практического применения, поэтому необходимо разработать специальный алгоритм, который обеспечит существенное уменьшение времени вычислений при сохранении показателей качества обработки.

**Анализ проблемной ситуации.** Обработка оцифрованной реализации ЭКГ, представленной  $N_{\Sigma}$  дискретными отсчетами  $\eta[k]$ ,  $k=0, 1, \dots, N_{\Sigma}-1$ , на основе корреляционно-экстремального метода заключается в вычислении нормированного коэффициента корреляции между эталонным QRS-комплексом  $s[k]$ ,  $k=0, 1, \dots, N-1$ , и анализируемым фрагментом ЭКГ на скользящем временном окне длиной  $N$  дискретных отсчетов [3]:

$$r[n] = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} (s[k] - M_s)(\eta[k+n] - M_{\eta}[n])}{\sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (s[k] - M_s)^2 \sum_{k=0}^{N-1} (\eta[k+n] - M_{\eta}[n])^2}}, \quad n = 0, 1, \dots, N_{\Sigma} - N - 2, \quad (1)$$

где

$$M_s = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s[k], \quad M_\eta[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \eta[k+n].$$

Принятие решения об обнаружении каждого QRS-комплекса на анализируемом интервале ЭКГ производится в соответствии с решающим правилом, принятым в теории обнаружения сигналов:  $r[n] > C$ . Локальные максимумы процесса  $r[n]$  на временных интервалах, где  $r[n] > C$ , определяют положения на временной оси опорных точек  $\tau_l$ ,  $l=1, 2, \dots, L$ , обнаруженных кардиоциклов, по которым осуществляется синхронизация в целях последующего их усреднения.

Одной из особенностей обработки ЭКГ для решения задач ЭКГ ВР является необходимость обеспечения минимально возможных значений ошибок оценивания опорных точек. Необходимое условие достижения этого требования — регистрация ЭКГ с частотой дискретизации  $F_\Delta$ , при которой инструментальная составляющая погрешности определения значений  $\tau_l$  окажется не менее чем на порядок ниже флуктуационной составляющей ошибки. При нормальных условиях регистрации ЭКГ это требование обеспечивается при  $F_\Delta \geq 10$  кГц [5], что на порядок превышает значение, рекомендуемое в настоящее время для ЭКГ ВР. В этом случае объем данных 5-минутной записи ЭКГ также увеличивается на порядок и составляет  $N_\Sigma = 3 \cdot 10^6$  дискретных отсчетов. Опыт показывает, что даже при использовании современных средств вычислительной техники без принятия специальных мер к снижению количества вычислительных операций время ожидания результата обработки такого объема данных обычно существенно превышает предел, при котором обеспечиваются условия психологически комфортной и оперативной работы медицинского персонала.

Для оценивания вычислительной сложности корреляционного метода обработки целесообразно провести декомпозицию формулы (1), представив ее в следующем виде:

$$r[n] = \frac{R[n]}{\sqrt{D_\eta[n]}}, \quad n = 0, 1, \dots, N_\Sigma - 1, \quad (2)$$

здесь

$$R[n] = \sum_{k=0}^{N-1} s_\circ[k] (\eta[k+n] - M_\eta[n]), \quad D_\eta[n] = \sum_{k=0}^{N-1} (\eta[k+n] - M_\eta[n])^2,$$

где компонент  $s_\circ[k] = \frac{s[k] - M_s}{\sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (s[k] - M_s)^2}}$ ,  $k = 0, 1, \dots, N-1$ , представляет собой нормированный центрированный эталонный кардиоцикл.

Результаты анализа требований к объему вычислений по выражению (2) при обработке всей зарегистрированной ЭКГ  $\{\eta[n], n=0, 1, \dots, N_\Sigma-1\}$  сведены в табл. 1.

Традиционно принято отдельно оценивать количество операций сложения (вычитания) и умножения (деления), поскольку время их выполнения различно. Однако во многих современных средствах вычислительной техники, используемых в устройствах вторичной обработки ЭКГ, время выполнения команд арифметических операций приблизительно одинаково.

В этом случае, суммируя выражения в последней строке табл. 1, можно оценить общий объем вычислений, требуемых для реализации корреляционно-экстремального метода обработки. При  $N_\Sigma \gg N$  общее количество операций

$$K_1 \cong 7N N_\Sigma. \quad (3)$$

В целом, вычислительная сложность корреляционно-экстремального метода возрастает пропорционально квадрату значения частоты дискретизации, и обработка реализации ЭКГ,

продолжающаяся при  $F_{\Delta}=1$  кГц примерно 10 с, при  $F_{\Delta}=10$  кГц потребует уже 20 мин. Для придания проблеме количественного выражения заметим, что при типичной длительности QRS-комплекса  $\{s[k]\}$  в 0,1 с и дискретизации ЭКГ с частотой  $F_{\Delta}=10$  кГц объем выборки для эталонного кардиоцикла составляет  $N=10^3$  отсчетов. В результате  $K_1 \cong 2 \cdot 10^{10}$  операций с вещественными числами, что представляет собой значительную вычислительную нагрузку даже для современных компьютеров.

Таблица 1

Вычислительная операция, количество	Компонент формулы (2)				
	$s_o[k] \forall k^*$	$M_{\eta}[n] \forall n$	$D_{\eta}[n] \forall n$	$R[n] \forall n$	$\frac{R[n]}{\sqrt{D_{\eta}[n]}} \forall n^{**}$
Сложение (вычитание)	$3N-1$	$(N-1)N_{\Sigma}$	$(2N-1)N_{\Sigma}$	$(2N-1)N_{\Sigma}$	0
Умножение (деление)	$2N+2$	$N_{\Sigma}$	$N N_{\Sigma}$	$N N_{\Sigma}$	$2N_{\Sigma}$
Всего операций	$5N+1$	$N N_{\Sigma}$	$(3N-1) N_{\Sigma}$	$(3N-1) N_{\Sigma}$	$2N_{\Sigma}$
<p>Примечания.</p> <p>* В расчет количества операций для <math>\{s_o[k]\}</math> включены затраты на вычисление <math>M_s</math>: <math>N-1</math> операций сложения и одна операция деления.</p> <p>** Здесь при оценке вычислительной сложности учтено то обстоятельство, что операция извлечения квадратного корня может быть исключена (взамен вводится дополнительная операция умножения), если при поиске опорных точек использовать не <math>r[n]</math>, а <math>r^2[n]</math> с эквивалентным решающим правилом <math>r^2[n] &gt; C^2</math>.</p>					

Таким образом, очевидно, что в первую очередь необходимо стремиться к сокращению количества вычислительных операций для наиболее ресурсоемких компонентов расчетной формулы (2):  $M_{\eta}[n]$ ,  $D_{\eta}[n]$  и  $R[n]$ . Компонент  $M_{\eta}[n]$  представляет собой выборочное математическое ожидание, компонент  $D_{\eta}[n]$  — выборочную дисперсию (с точностью до постоянного множителя), вычисляемые на скользящем временном окне по дискретным отсчетам обрабатываемого процесса  $\{\eta[k]\}$ : для их расчета следует использовать рекуррентные формулы. Корреляционный компонент  $R[n]$  можно преобразовать в формат цифровой свертки, для уменьшения объема вычислений которой существуют специальные методы [6—8].

**Синтез и оптимизация алгоритмов обработки ЭКГ на основе корреляционно-экстремального метода.** Выполняя замену переменных дискретного времени, нетрудно обеспечить тождественное преобразование уравнения (1) в формат, где структура выражения в числителе соответствует структуре выражения для цифровой свертки:

$$r[n-(N-1)] = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} (\tilde{s}[k] - \tilde{M}_s)(\eta[n-k] - \tilde{M}_{\eta}[n])}{\sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (\tilde{s}[k] - \tilde{M}_s)^2 \sum_{k=0}^{N-1} (\eta[n-k] - \tilde{M}_{\eta}[n])^2}}, \quad n = N-1, N, \dots, N_{\Sigma}-1,$$

где  $\{\tilde{s}[k]\}$  — „зеркальное“ отображение выборки эталонного кардиоцикла, выполняемое перестановкой отсчетов:

$$\tilde{s}[k] = s[N-1-k], \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad \tilde{M}_s = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}[k] = M_s, \quad \tilde{M}_{\eta}[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \eta[n-k].$$

Проведя декомпозицию выражения для  $r[n-(N-1)]$ , получим

$$\tilde{r}[n] = r[n-(N-1)] = \frac{\tilde{R}[n]}{\sqrt{\tilde{D}_{\eta}[n]}}, \quad n = N-1, N, \dots, N_{\Sigma}-1, \quad (4)$$

где

$$\tilde{R}[n] = \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}_\circ[k] (\eta[n-k] - \tilde{M}_\eta[n]), \quad \tilde{D}_\eta[n] = \sum_{k=0}^{N-1} (\eta[n-k] - \tilde{M}_\eta[n])^2,$$

а выражение  $\tilde{s}_\circ[k] = \frac{s[N-1-k] - M_s}{\sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (s[k] - M_s)^2}}$ ,  $k = 0, 1, \dots, N-1$ , представляет собой нормированный

центрированный эталонный сигнал.

Основное ресурсопотребление приходится на вычисление компонентов  $\tilde{M}_\eta[n]$ ,  $\tilde{D}_\eta[n]$  и  $\tilde{R}[n]$ . Первые два компонента при  $n > N-1$  вычисляются по рекуррентным выражениям

$$\tilde{M}_\eta[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \eta[n-k] = \tilde{M}_\eta[n-1] + \frac{1}{N} (\eta[n] - \eta[n-N]) \quad (5)$$

и

$$\tilde{D}_\eta[n] = \tilde{D}_\eta[n-1] + \eta^2[n] - \eta^2[n-N] - N\tilde{M}_\eta^2[n]. \quad (6)$$

Краевой эффект, связанный с невозможностью использовать итерационные формулы (5) и (6) на интервале  $0 \leq n < N$ , для оценки их вычислительной сложности при  $N_\Sigma \gg N$  можно не учитывать.

Относительно оптимизации вычислений компонента  $\tilde{R}[n]$  необходимо предварительно отметить следующую возможность упрощения расчетной формулы:

$$\begin{aligned} \tilde{R}[n] &= \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}_\circ[k] (\eta[n-k] - \tilde{M}_\eta[n]) = \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}_\circ[k] \eta[n-k] - \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}_\circ[k] \tilde{M}_\eta[n] = \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}_\circ[k] \eta[n-k] - \tilde{M}_\eta[n] \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}_\circ[k] = \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}_\circ[k] \eta[n-k], \end{aligned}$$

так как эталонный сигнал центрирован:  $\sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}_\circ[k] = 0$ .

Для ускорения вычислений цифровой свертки

$$\tilde{R}[n] = \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{s}_\circ[k] \eta[n-k], \quad n = 0, 1, \dots, N_\Sigma - 1,$$

имеется множество способов, из которых наиболее удобным для построения конструктивных вычислительных алгоритмов является метод на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ). В частности, для  $n = N, N+1, \dots, N_\Sigma - 1$  (с точностью до пренебрежимо малого краевого эффекта при начальных переменных  $0 \leq n < N$ ) алгоритм расчета содержит следующие действия.

$$\text{Шаг 1. } \tilde{S}_\circ[n] = F\{\tilde{s}_\circ[n]\}, \quad n = 0, 1, \dots, N_\Sigma - 1, \quad \text{где } \tilde{s}_\circ[n] = \begin{cases} \tilde{s}_\circ[n], & n = 0, 1, \dots, N-1; \\ 0, & n = N, N+1, \dots, N_\Sigma - 1. \end{cases}$$

$$\text{Шаг 2. } X[n] = F\{\eta[n]\}, \quad n = 0, 1, \dots, N_\Sigma - 1.$$

$$\text{Шаг 3. } Y[n] = \tilde{S}_\circ[n] X[n], \quad n = 0, 1, \dots, N_\Sigma - 1.$$

$$\text{Шаг 4. } \tilde{R}[n] = F^{-1}\{Y[n]\}, \quad n = 0, 1, \dots, N_\Sigma - 1.$$

Здесь операторы  $F\{\dots\}$  и  $F^{-1}\{\dots\}$  обозначают вычислительные процедуры прямого и обратного быстрого преобразования Фурье соответственно.

Известно, что наибольшее ускорение вычислений при реализации алгоритмов БПФ дос-

тигается, если длина обрабатываемого массива равна целой степени числа 2, чего всегда можно добиться, дополняя обрабатываемую последовательность нулевыми отсчетами. При  $N_{\Sigma}=2^m$ , где  $m$  — натуральное число, алгоритмы прямого и обратного БПФ требуют по  $N_{\Sigma}\log_2 N_{\Sigma}$  операций сложения комплексных чисел и по  $\frac{N_{\Sigma}}{2}\log_2 N_{\Sigma}$  операций комплексного умножения. Учитывая, что одна операция сложения комплексных чисел требует двух операций сложения вещественных чисел, а одна операция комплексного умножения — четырех операций умножения и двух операций сложения вещественных чисел, нетрудно убедиться, что вычисление цифровой свертки с помощью рассмотренного 4-шагового алгоритма требует  $9N_{\Sigma}\log_2 N_{\Sigma}$  операций сложения и  $6N_{\Sigma}\log_2 N_{\Sigma}+4N_{\Sigma}$  операций вещественного умножения.

Результаты оценивания количества вычислительных операций, необходимых для расчета компонентов формулы (4), с применением 4-шагового алгоритма расчета цифровой свертки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Вычислительная операция, количество	Компонент формулы (4)				
	$\tilde{s}_o[k] \forall k$	$\tilde{M}_n[n] \forall n$	$\tilde{D}_n[n] \forall n$	$\tilde{R}_n[n] \forall n$	$\frac{\tilde{R}[n]}{\sqrt{\tilde{D}_n[n]}} \forall n$
Сложение (вычитание)	$3N-1$	$2N_{\Sigma}$	$3N_{\Sigma}$	$9N_{\Sigma}\log_2 N_{\Sigma}$	0
Умножение (деление)	$2N+2$	$N_{\Sigma}$	$4N_{\Sigma}$	$(6\log_2 N_{\Sigma}+4)N_{\Sigma}$	$2N_{\Sigma}$
Всего операций	$5N+1$	$3N_{\Sigma}$	$7N_{\Sigma}$	$(15\log_2 N_{\Sigma}+4)N_{\Sigma}$	$2N_{\Sigma}$

Суммируя выражения в последней строке табл. 2, при  $N \ll N_{\Sigma}$  количество вычислительных операций можно оценить величиной  $(15\log_2 N_{\Sigma}+16)N_{\Sigma}$ , а при  $N_{\Sigma} \neq 2^m$ , когда обрабатываемая последовательность дополняется нулями, — величиной

$$K_2 = (15\log_2 2^{\lceil \log_2 N_{\Sigma} \rceil} + 16) \cdot 2^{\lceil \log_2 N_{\Sigma} \rceil}, \quad (7)$$

где оператор  $\lceil \dots \rceil$  выполняет округление до целого в бóльшую сторону.

При оговоренных ранее условиях регистрации ЭКГ формула (7) дает оценку в  $K_2 \cong 1,5 \cdot 10^9$  арифметических операций, что на порядок меньше, чем полученная по табл. 1 оценка для метода прямых вычислений  $K_1 \cong 2 \cdot 10^{10}$ .

Следует отметить, что данный выигрыш получен именно за счет уменьшения количества вычислительных операций для расчета цифровой свертки, поскольку если в методе прямых вычислений реализовать только итерационные методы (5) и (6) с учетом центрирования эталонного сигнала, но цифровую свертку вычислять прямым методом, то общее количество вычислительных операций составит

$$K_{\text{ит}} = (2N+12)N_{\Sigma}. \quad (8)$$

Эта оценка дает  $K_{\text{ит}} \cong 6 \cdot 10^9$ , что в 4 раза больше значения  $K_2$ .

Дополнительно сократить количество вычислительных операций для расчета цифровой свертки удастся при переходе к алгоритмам вычисления секционированных сверток [6—8]: перекрытия с суммированием или перекрытия с накоплением, которые по потенциальным возможностям ускорения вычислительного процесса эквивалентны.

На рис. 1 приведена структурная схема алгоритма вычисления секционированной свертки по методу перекрытия с накоплением. Здесь свертка вычисляется постепенно, посредством обработки секций длиной  $N_{\Delta}$  дискретных отсчетов, а эталонным является сигнал  $\{w[k]\}$ , представляющий собой выбранный QRS-комплекс, подвергнутый „зеркальному“ отображению, центрированный и дополненный нулями начиная от исходных  $N$  отсчетов до  $N_s=2^m$ .

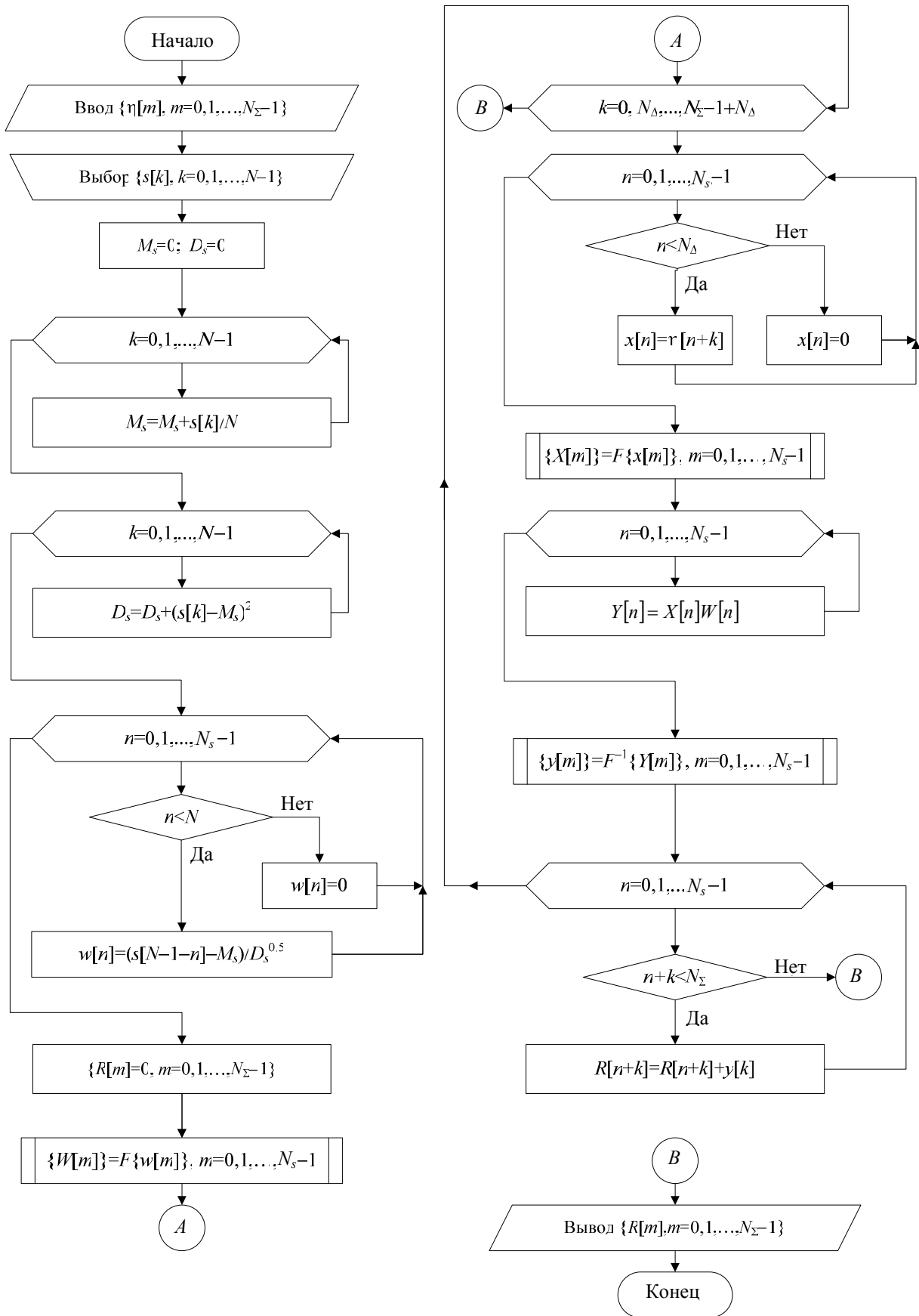


Рис. 1

Анализ схемы алгоритма с учетом того, что для рассматриваемого метода  $N+N_\Delta=N_s$ , позволяет общее количество операций с вещественными числами, требуемых для вычисления  $\tilde{R}[n]$ ,  $n = N, N+1, \dots, N_\Sigma-1$ , оценить величиной

$$K_{\tilde{R}[n]} = 5N_s \log_2 N_s + \frac{N_\Sigma}{N_s - N} (10N_s \log_2 N_s + 9N_s). \quad (9)$$

Аналитическое исследование выражения (9) на экстремум в целях выбора значения параметра  $N_s$ , представляет собой проблему, сложность которой не соответствует масштабу решаемой задачи, поэтому оценивание выигрыша в быстродействии при различных  $N_s$  производилось численными методами. Следует заметить, что, в отличие от 4-шагового алгоритма вычисления цифровой свертки, при реализации метода вычисления секционированной свертки реализацию ЭКГ дополнять нулями не требуется. На рис. 2 приведен график построенной по формуле (9) зависимости величины  $K_{\tilde{R}[n]}$  от значения  $N_s$ , определяющего количество отсчетов (длину) в эталонном сигнале, при типовых исходных данных  $N = 10^3$  и  $N_\Sigma = 3 \cdot 10^6$ .

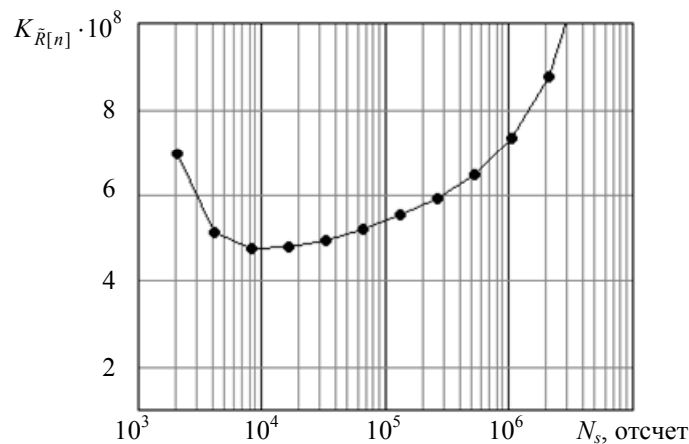


Рис. 2

Как видно из графика, минимальное значение  $K_{\tilde{R}[n]}$  достигается при  $N_s=2^{13}$ , причем выбор значения  $N_s$  в плане минимизации вычислительной сложности алгоритма расчета цифровой свертки не слишком критичен.

Прибавив к выражению (9) величину  $12N_\Sigma$  (общее количество операций, требуемых для вычисления  $\tilde{M}_\eta[n] \forall n$ ,  $\tilde{D}_\eta[n] \forall n$  и  $\frac{\tilde{R}[n]}{\sqrt{\tilde{D}_\eta[n]}}$   $\forall n$ , согласно данным табл. 2, последняя строка),

получим итоговое выражение, определяющее количество вычислительных операций, необходимых для оптимизированного алгоритма вычислений коэффициента корреляции  $\{r[n]\}$  для всей реализации ЭКГ:

$$K_3 = 5N_s \log_2 N_s + \frac{N_\Sigma}{N_s - N} (10N_s \log_2 N_s + 9N_s) + 12N_\Sigma. \quad (10)$$

Расчет по формуле (9) при  $N=10^3$ ,  $N_s=2^{13}$  и  $N_\Sigma=3 \cdot 10^6$  дает  $K_3=5,2 \cdot 10^8$  операций.

Таким образом, применение специально разработанных методов и вычислительных алгоритмов позволяет существенно сократить избыточность вычислений при корреляционно-экстремальной обработке электрокардиографических сигналов, при этом обеспечивается возможность точного вычисления всех значений коэффициентов  $r[n]$ ,  $n=0, 1, \dots, N_\Sigma-N-2$ , как если бы они вычислялись непосредственно по формуле (1).

**Анализ результатов исследования.** Количественные характеристики оптимизации алгоритма обработки электрокардиограмм на основе корреляционно-экстремального метода получены в предположении о выполнении повышенных требований к дискретизации процессов в области ЭКГ ВР и к выбору „длины“ эталонного сигнала, обеспечивающего минимально возможное значение дисперсии ошибки оценивания временных положений опорных точек QRS-комплексов. Однако в настоящее время распространены электрокардиографические системы, работающие при меньших частотах дискретизации. Кроме того, „длина“ эталонного сигнала может быть выбрана меньшей, чем длительность полного QRS-комплекса, хотя, конечно, при этом несколько ухудшаются показатели качества обработки ЭКГ [3]. Результаты сравнительного анализа эффективности исследованных вычислительных алгоритмов на основе корреляционно-экстремального метода при различных сочетаниях параметров обработки 5-минутной записи ЭКГ приведены в табл. 3 (здесь  $T_{эТ}$  — длительность эталонного сигнала в непрерывном времени).

Таблица 3

Параметр регистрации ЭКГ		Параметр вычислительного алгоритма, отчет			Количество требуемых вычислительных операций для расчета $r[n] \forall n$			
$T_{эТ}, c$	$F_{\Delta}, Гц$	$N_{\Sigma}$	$N$	$N_{с\text{ опт}}$	$K_1$	$K_{1\text{ ит}}$	$K_2$	$K_3$
0,1	$10^4$	$3 \cdot 10^6$	$10^3$	$2^{13}$	$2 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^9$	<b><math>5,2 \cdot 10^8</math></b>
	$5 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^2$	$2^{12}$	$5,2 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^9$	$7,0 \cdot 10^8$	<b><math>2,4 \cdot 10^8</math></b>
	$2 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^2$	$2^{11}$	$8,4 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^8$	$3,3 \cdot 10^8$	<b><math>8,7 \cdot 10^7</math></b>
	$10^3$	$3 \cdot 10^5$	$10^2$	$2^{10}$	$2 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^8$	<b><math>4 \cdot 10^7</math></b>
0,06	$10^4$	$3 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^2$	$2^{13}$	$1,3 \cdot 10^{10}$	$3,6 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^9$	<b><math>4,9 \cdot 10^8</math></b>
0,04			$4 \cdot 10^2$	$2^{12}$	$8,4 \cdot 10^9$	$2,4 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^9$	<b><math>4,7 \cdot 10^8</math></b>
0,02			$2 \cdot 10^2$	$2^{11}$	$4,2 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^9$	<b><math>4,3 \cdot 10^8</math></b>
0,01			$10^2$	$2^{10}$	$2 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^9$	<b><math>4 \cdot 10^8</math></b>
0,06	$10^3$	$3 \cdot 10^5$	60	$2^9$	$1,2 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^8$	<b><math>3,8 \cdot 10^7</math></b>
0,04			40	$2^8$	$8,4 \cdot 10^7$	<b><math>2,8 \cdot 10^7</math></b>	$1,5 \cdot 10^8$	$3,6 \cdot 10^7$
0,02			20	$2^7$	$4,2 \cdot 10^7$	<b><math>1,6 \cdot 10^7</math></b>	$1,5 \cdot 10^8$	$3,2 \cdot 10^7$
0,01			10	$2^6$	$2 \cdot 10^7$	<b><math>10^7</math></b>	$1,5 \cdot 10^8$	$2,8 \cdot 10^7$

Примечание. Полужирным шрифтом выделены минимальные значения количества вычислительных операций при каждом сочетании исходных параметров алгоритма.

Данные, приведенные в табл. 3, дают наглядное представление об относительной эффективности сокращения количества вычислительных операций при использовании различных исследованных алгоритмов. Решение задачи оптимизации, обусловленной необходимостью уменьшить недопустимо большое время вычислений при обработке электрокардиограмм на высокой частоте дискретизации с применением „длинного“ эталонного сигнала, демонстрирует неплохие результаты: количество вычислительных операций сокращается более чем на порядок. При обработке кардиограмм, зарегистрированных при стандартной частоте дискретизации  $F_{\Delta}=10^3$  Гц и умеренных требованиях к показателям качества обработки, предложенный вычислительный алгоритм (см. рис. 1) показывает более скромные результаты: в ряде случаев он становится соизмеримым по эффективности и даже проигрывает методу прямых вычислений коэффициента корреляции с применением итерационных процедур (что видно при сравнении  $K_3$  и  $K_{1\text{ ит}}$ ).

Как показали результаты проведенного тестирования разработанных алгоритмов, время выполнения каждого из них не пропорционально соответствующей оценке количества вычислительных операций. В табл. 4 приведены результаты сравнительного анализа времени вычислений при использовании исследованных алгоритмов. Тестирование производилось в



программной среде MathCAD 14 на компьютере с процессором Intel® Core™ 2 Duo CPU E4600, 2,4 ГГц, с объемом ОЗУ в 1 Гб под управлением ОС Windows XP Professional Ed. SP2, с использованием авторских алгоритмов и программного обеспечения [9, 10].

Вообще, данные о сравнительной эффективности различных вычислительных алгоритмов на основе корреляционно-экстремального метода могут варьироваться в зависимости от особенностей аппаратной платформы, применяемой операционной системы и свойств компилятора используемой вычислительной среды. Сравнение данных табл. 3 и 4 показывает, что относительный выигрыш во времени выполнения для алгоритмов на основе БПФ оказывается намного больше, чем следует из формальных оценок количества вычислительных операций, и разработанный алгоритм на основе метода секционированной свертки обеспечивает минимальное время вычислений при любых исходных параметрах сигнала. Связано это, по-видимому, с тем, что алгоритм БПФ хорошо приспособлен для параллельных вычислений, поддерживаемых современными процессорами на аппаратном уровне.

Таблица 4

Параметр регистрации ЭКГ		Параметр вычислительного алгоритма, отсчет			Время вычисления $r[n] \forall n$ , с, для		
$T_{эт}$ , с	$F_{\Delta}$ , Гц	$N_{\Sigma}$	$N$	$N_{s\text{ опт}}$	$K_{\text{итг}}$	$K_2$	$K_3$
0,1	$10^4$	$3 \cdot 10^6$	$10^3$	$2^{13}$	1470	33	12
	$5 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^2$	$2^{12}$	225	16	6
	$2 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^2$	$2^{11}$	40	8	3
	$10^3$	$3 \cdot 10^5$	$10^2$	$2^{10}$	10	4	1,5
0,06	$10^4$	$3 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^2$	$2^{13}$	880	33	12,2
0,04			$4 \cdot 10^2$	$2^{12}$	500	33	12,3
0,02			$2 \cdot 10^2$	$2^{11}$	200	33	12,2
0,01			$10^2$	$2^{10}$	104	33	12
0,06	$10^3$	$3 \cdot 10^5$	60	$2^9$	7,5	4	1,3
0,04			40	$2^8$	5	4	1,3
0,02			20	$2^7$	3,2	4	1,3
0,01			10	$2^6$	2,4	4	1,3

Примечание. Алгоритм прямых вычислений, дающий оценку вычислительных операций  $K_1$  по формуле (3), не тестировался по причине огромных непроизводительных затрат машинного времени при очевидном результате.

**Заключение.** Достигнутые результаты оптимизации вычислительного алгоритма обработки ЭКГ на основе корреляционно-экстремального метода следующие: при необходимых требованиях к параметрам зарегистрированных процессов и правильном выборе параметров алгоритма время вычислений сокращается в десятки раз по сравнению с методом прямых вычислений, обеспечивая комфортную работу пользователя. С практической точки зрения, выигрыш в быстродействии становится значимым только при повышенной частоте дискретизации, которая необходима для реализации перспективных подходов к обработке ЭКГ с высоким разрешением [4, 5]. Таким образом, разработанный и исследованный алгоритм является специфическим инструментальным средством для решения задач электрокардиографии высокого разрешения при требовании достижения наилучших показателей качества обработки сигнала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрокардиография высокого разрешения / Под ред. Г. Г. Иванова, С. В. Грачева, А. Л. Сыркина. М.: Издво „Триада-Х“, 2003. 304 с.

2. Кардиомониторы. Аппаратура непрерывного контроля ЭКГ: Учеб. пособие / Под ред. А. Л. Барановского и А. П. Немирко. М.: Радио и связь, 1993. 248 с.
3. Жаринов О. О., Жаринов И. О. Применение корреляционно-экстремального метода для решения задач обнаружения и оценивания положений опорных точек QRS-комплексов в электрокардиограмме // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 5 (75). С. 85—90.
4. Жаринов О. О., Жаринов И. О. Электрокардиография высокого разрешения: новый подход к обработке сигнала // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2006. № 33. С. 106—120.
5. Жаринов О. О. К вопросу о разрешающей способности метода электрокардиографии высокого разрешения // Вестник молодых ученых. 2003. № 6. С. 33—38.
6. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1985. 248 с.
7. Арутюнов П. А. Теория и применение алгоритмических измерений. М.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
8. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов: практический подход: Пер. с англ. М.: Изд. дом „Вильямс“, 2004. 992 с.
9. А.с. 2753 ОФАП. Программа исследования на ЭВМ корреляционно-экстремального алгоритма обнаружения QRS-комплексов электрокардиограммы / О. О. Жаринов, И. О. Жаринов. М.: ВНИИЦ, № 50200300257. 2003.
10. Жаринов И. О., Жаринов О. О. Статистический анализ информационных процессов с повторяющимися признаками формы в электрофизиологических исследованиях и медицинском приборостроении: Монография. СПб: Изд-во „Нестор-история“, 2011. 151 с.

**Сведения об авторах**

- Олег Олегович Жаринов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра моделирования вычислительных и электронных систем; E-mail: zharinov73@hotmail.ru
- Игорь Олегович Жаринов** — д-р техн. наук, доцент; ФГУП «СПб ОКБ „Электроавтоматика“ им. П. А. Ефимова», Санкт-Петербург; руководитель учебно-научного центра; E-mail: igor\_rabota@pisem.net

Рекомендована кафедрой  
машинного проектирования бортовой  
электронно-вычислительной  
аппаратуры НИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
01.09.13 г.