

Ю. Б. ФОГЕЛЬСОН  
(Москва)

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭКГ. ОЦЕНКА ФОРМЫ СИГНАЛА

В течение последних двух десятилетий многими исследователями интенсивно ведутся работы по автоматическому измерению параметров электрокардиограмм (ЭКГ) с последующей диагностикой по этим параметрам. Это связано с тем, что современная электрокардиография достигла такого уровня, при котором представляется возможным формализация способа принятия решения человеком. Электрокардиографистами разработано много однозначных правил, использующих не слишком большое число признаков, и даже сделана попытка свести эти правила в систему, получившую название «Minnesota code». Подробный обзор современного состояния проблемы сделан в [1].

Правила принятия решения используют в качестве признаков некоторые параметры зубцов (пиков) на кривой ЭКГ, и поэтому неудивительно, что в работах по автоматизации ЭКГ диагностики основной упор сделан на создание алгоритмов автоматического измерения этих параметров. Однако хорошо известно, что перед детальной оценкой параметров зубцов электрокардиографист обязательно проводит подготовительную работу, например:

выделяет «хорошие» участки кривой ЭКГ (при этом в понятие «хороший» вкладывается не только отсутствие помех, но и выраженность различных изменений);

выбирает отведения, в которых наиболее четко выражен какой-либо конкретный зубец;

оценивает правильность наложения электродов, так как они иногда бывают перепутаны и т. д.

Эта работа проводится на основе визуальной оценки общей формы кривой и занимает довольно большую часть времени анализа. Этот аспект деятельности электрокардиографиста исследователи в своих работах обходят. Однако ясно, что если предварительная обработка проводится вручную, то задача автоматического измерения параметров ЭКГ не может считаться полностью решенной. В 1971 г. группой математиков и врачей, сотрудничающих в области ЭКГ диагностики, было показано, что при диагностике некоторых заболеваний общая форма комплекса ЭКГ является весьма информативным признаком [2]. В 1974 г. эта мысль нашла отражение в руководстве [3], где перечислены наиболее часто встречающиеся формы комплексов ЭКГ и указана возможность применения этого признака при диагностике.

Резюмируя изложенное, можно заключить, что решение задачи автоматической оценки формы кривой ЭКГ необходимо для полной автоматизации измерения параметров ЭКГ и полезно для последующей диагностики. Этому и посвящена настоящая работа.

Заметим сначала, что использование понятия «общая форма кривой ЭКГ» возможно потому, что ЭКГ представляет собой последовательность так называемых комплексов пиков и эти комплексы имеют одинаковую форму, т. е. в каждом комплексе, например, «первым идет небольшой по амплитуде пик с закругленной вершиной, затем следует резкий скачок вниз, далее скачок вверх так, что образуется треугольный пик вершиной вниз и т. д.» (рис. 1). Это описание может

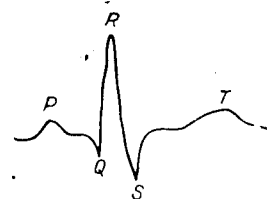


Рис. 1. Типичная форма импульса ЭКГ.

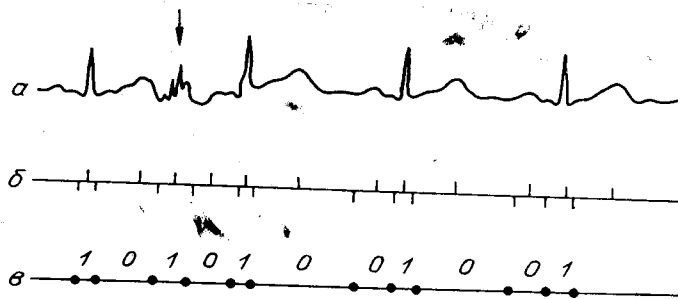


Рис. 2. Выделение периодичности пиков ЭКГ:  
 а — участок реальной ЭКГ с артефактом (отмечен стрелкой); б — расположение экстремумов; в — последовательность  $\{g_k\}$  (точками обозначены границы пиков).

меняться от ЭКГ к ЭКГ и даже от отведения к отведению, но в пределах одного отведения оно сохраняется и представляет собой описание формы комплекса. Конечно, это описание было бы несложно перевести на язык цифр, используя первую и вторую производные (или разности), однако дело осложняется наличием в реальной ЭКГ помех. Предложенный ниже алгоритм позволяет оценивать форму комплекса и в этих условиях. Одновременно он позволяет выделять участки кривой, на которых нарушено нормальное чередование пиков, и тем самым устранить их как непригодные для дальнейшей работы. Эти участки с нарушенным чередованием пиков принято называть артефактами.

Обозначим участок кривой ЭКГ  $S(t)$ ,  $0 \leq t \leq T$  (см., например, рис. 2, а). В [4] приведен алгоритм, позволяющий оценивать местоположение экстремумов сигнала в шумах, если пики шума отличаются от пиков сигнала по параметрам. На рис. 2, б показано расположение экстремумов, полученное в результате работы алгоритма из [4]. Видно, что, кроме пиков полезного сигнала, выделился и артефакт. Обозначим положение  $i$ -го экстремума  $\bar{t}_i$ , если это максимум, и  $\underline{t}_i$ , если это минимум. Часть кривой  $S(t)$  в промежутке  $\underline{t}_i \leq t \leq \underline{t}_{i+2}$  будем называть  $i$ -м пиком и обозначать  $P_i$ . Будем описывать  $P_i$  с помощью некоторого количества параметров, таких, как амплитуда

$$A_i = S(\bar{t}_{i+1}) - (S(\underline{t}_i) + S(\underline{t}_{i+2})) / 2,$$

длительность

$$\tau_i = \underline{t}_{i+2} - \underline{t}_i$$

и любых других, отражающих форму пика. Поскольку рассматриваемое описание пиков может применяться не только при анализе ЭКГ, будем обозначать  $j$ -й параметр  $i$ -го пика  $p_j^i$  и придавать ему конкретный смысл по мере необходимости. Введем теперь характеристику формы пика  $f(p)$ . Можно вводить разные функции  $f$ , так как от характеристики требуется только, чтобы на разных по форме пиках она принимала разные значения. Одной из естественных характеристик является

$$|P| = \sqrt{\sum_{j=1}^N (p_j)^2},$$

где  $N$  — количество параметров. Например, если мы интересуемся только амплитудой и длительностью пика, то

$$|P_i| = \sqrt{C_A A_i^2 + C_\tau \tau_i^2}, \quad (1)$$

где  $C_A$  и  $C_\tau$  — размерные масштабные коэффициенты.

Введем теперь понятие структурной последовательности сигнала  $S(t)$ . Рассмотрим последовательность  $f(P_0)f(P_1)\dots f(P_n)$ , где  $n+1$  — количество пиков на участке  $0 \leq t \leq T$ , и преобразуем ее в последовательность  $g_1, g_2, \dots, g_n$ , положив

$$g_k = \begin{cases} 1, & f(P_k) > f(P_{k-1}); \\ 0, & f(P_k) \leq f(P_{k-1}). \end{cases}$$

Последовательность  $\{g_k\}$  будем называть структурной последовательностью сигнала  $S(t)$  при характеристике  $f$ .

Теперь ясно, что для сигналов типа ЭКГ с регулярно повторяющимся комплексом одинаковых по форме пиков структурная последовательность  $\{g_k\}$  должна быть периодической, а набор нулей и единиц, составляющий период, должен представлять некоторое описание формы комплекса пиков. В дальнейшем под терминами «период», «длина периода» и «разряд» мы будем подразумевать повторяющийся набор нулей и единиц, длину этого набора и местоположение соответствующего символа в последовательности. Очевидна также роль артефактов: они просто вносят сбой в периодическую последовательность  $\{g_k\}$ . На рис. 2, в приведена последовательность  $\{g_k\}$ , соответствующая сигналу рис. 2, а и характеристике (1).

Таким образом, задачи определения общей формы комплекса пиков и поисков артефактов сводятся к задаче восстановления периодической двоичной последовательности из сбойной. К ней мы и перейдем.

В двоичной последовательности можно представить себе 2 типа сбоев: замена символа и вставка или удаление символа. Очевидно, что, рассматривая произвольную периодическую последовательность и производя в ней произвольно сбой двух указанных выше типов, можно получить любую двоичную последовательность. Отсюда ясно, что при известной статистике сбоев речь может идти лишь о вероятности, с которой данный набор нулей и единиц является истинным периодом. Ясно, что максимальную информацию об истинном периоде извлекает из сбойной последовательности формула Байеса, т. е. перепробовав все наборы нулей и единиц, по формуле Байеса можно отыскать наиболее вероятный. Однако при этом требуется перебрать очень много вариантов и знать распределения сбоев. Ниже будет предложен способ, который, не являясь теоретически безупречным, быстро приводит к решению при малом количестве сбоев и не требует при этом сведений о распределениях.

Применив к двоичной последовательности  $\{g_k\}$  операцию циклической свертки, получим циклическую автокорреляционную функцию

$$B(r) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i g_{(i+r) \bmod n}, \quad r = 1 \dots n.$$

Если исходная последовательность периодическая или имеет небольшое число сбоев, то расстояние до первого пика  $B(r)$  будет длиной периода. Пусть оно равно  $m$ . Теперь найдем число единиц  $e$  в одном периоде:

$$e = [Em/n].$$

Здесь  $E$  — общее число единиц в последовательности,  $n$  — ее длина, а  $[...]$  означает операцию взятия ближайшего целого. Для последовательности рис. 2, в, например  $m=3$ ,  $e = [(5 \cdot 3)/13] = 1$ .

Теперь заметим, что период до сбоя и период после сбоя могут отличаться друг от друга только циклическим сдвигом на некоторое число разрядов. Поэтому в дальнейшем период определяется с точностью до такого сдвига. Для этого рассмотрим все возможные расположения



ключаются, как правило, в отсутствии информации о том, какие зубцы имеются в данном отведении и какие из них наиболее ярко выражены. Врач же легко решает эту задачу, не вдаваясь в тонкости анализа кривой, а просто оценивая общую форму комплекса визуально. Заметим, что описанный алгоритм также позволяет получить подобную информацию в формализованном виде до проведения тонкого анализа зубцов.

В заключение следует отметить, что предложенный выше способ представления сигнала его структурной последовательностью оказывается весьма полезным при анализе таких тонких свойств сигнала, как формы пиков или их чередование. Способ хорош тем, что позволяет свести работу с пиками к работе с двоичными последовательностями.

Автор считает своим приятным долгом поблагодарить профессора Мановцева А. П. за поддержку при написании данной работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кокс, Нолл, Артур. Анализ электроэнцефалограмм, кривых кровяного давления и электрокардиограмм на цифровой вычислительной машине.— В кн.: Распознавание образов при помощи цифровых вычислительных машин. М., «Ми», 1974.
2. Гельфанд И. М., Гельштейн Г. Г., Губерман Ш. А., Ротвайн И. М., Файн Т. Л. Об оценке давления в легочной артерии по данным электро- и фонокардиографии.— «Кардиология», 1971, № 5, с. 84—88.
3. Бобер С., Домбровская Б., Домбровский А. Практическая электрокардиография. Варшава, Польское мед. изд-во, 1974.
4. Фогельсон Ю. Б. Об одном способе поиска экстремумов сигнала в шумах.— «Автоматрия», 1976, № 5, с. 41—44.

Поступила в редакцию 25 февраля 1976 г.

УДК 62—503.32

Н. С. АНИШИН, А. М. ТИВКОВ

(Краснодар)

### УСКОРЕННЫЙ АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ПОГРЕШНОСТИ

С целью уменьшения аппаратурных затрат и повышения скорости умножения в работе [1] предложен алгоритм приближенного вычисления корреляции (свертки) функций, использующий свойства двоичной арифметики.

Для случая, когда отсчеты одного из сигналов, например  $x(t)$ , представлены в формате с фиксированной запятой, алгоритм таков:

$$B(kT) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} Y(nT + kT) (0,1)^{r_n} \text{sign}[X_1(nT)], \quad (1)$$

где  $X_1(nT)$  вычисляется по рекуррентной формуле

$$X_1(nT) = X_1(nT - T) - (0,1)^{r_{n-1}} \text{sign}[X_1(nT - T)] + X(nT),$$

$X(nT) = x(nT)$ ;  $r_n$  выбирается из условия

$$1,1 \cdot 10^{-r_n} > |X_1(nT)| \geq 1,1 \cdot 10^{-(r_n+1)}.$$

На  $r_n$  накладывается ограничение по технической реализации  $0 < r_n \leq s$ . При этом  $r_n = s$ , если

$$1,1 \cdot 10^{-s} > |X_1(nT)| \geq 1,0 \cdot 10^{-(s+1)}.$$

При значениях  $|X_1(nT)| < 10^{-(s+1)}$  величина  $(0,1)^{r_n}$  в (1) принимается равной 0.

Основная погрешность алгоритма связана с округлением цифровых отсчетов одного из сигналов, например  $X(nT)$ , до одного из уровней