

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СИГНАЛА ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ ИЗ ЕЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Реджепов В.А., Перцев Д.Ю.

*Белорусский государственный университет информатики и
радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь*

vladimir.redzhepov@gmail.com

Некоторые модели смарт-часов имеют возможность записи электрокардиограммы (ЭКГ). Пользователь записывает ЭКГ в отведении I, нажимая на заводную головку пальцем руки, противоположной руке с электродом на корпусе часов. Данные ЭКГ, записанные во время сеанса, сохраняются и при желании могут быть экспортированы в формате изображения. Для последующего автоматизированного анализа данных должен быть восстановлен сигнал ЭКГ в цифровом виде.

Стандартную 12-канальную ЭКГ в клинической практике получают, используя четыре отведения от конечностей и грудные отведения в 6 позициях. Правая нога используется для нейтрального электрода. Левая рука, правая рука и левая нога используются для получения отведений I, II и III. Усиленные отведения от конечностей известны как aVR, aVL и aVF (aV – усиленные отведения, R – от правой руки, L – от левой руки, F – от левой ноги). Шесть грудных отведений (как правило, обозначаемые V1-V6) получают с 6 стандартизованных позиций на грудной клетке [1]. Несмотря на свою избыточность, система из 12 отведений используется как основа для стандартных клинических исследований ЭКГ, имеющая решающее значение для диагностики аритмий, инфаркта миокарда и других сердечных заболеваний [2].

Традиционно аналоговые и цифровые электрокардиографы печатали на термобумаге со скоростью 25 мм/с и масштабом по вертикали 0,1 мВ на 10 мм. Современные электрокардиографы, независимо от того, печатают ли они бумажные копии или создают изображения в формате PDF, используют одни и те же соглашения. Стандартная бумажная ЭКГ имеет две сетки: грубую сетку 5x5 мм, соответствующую 0,5 мВ в вертикальном (амплитуда) и 0,2 с в горизонтальном (время) направлениях, и мелкую сетку 1x1 мм, соответствующую 0,1 мВ и 40 мс в вертикальном и горизонтальном направлениях соответственно, как показано на рисунке 1. Исторически сложилось так, что калибровочный импульс амплитудой 1 мВ и шириной 0,2 с также печатается на большинстве бумажных ЭКГ [3].

Хотя большинство бумажных сеток ЭКГ имеют красно-розовый цвет, общепринятого стандарта для цвета бумаги не существует. Современные цифровые ЭКГ обычно генерируются в виде файлов PDF для бумаги формата A4 или Letter. Стандартные бумажные ЭКГ обычно отображают все 12 отведений в сегментах по 2,5 с в четырех строках. Кроме того, отведения II, V1, V2 или V5 часто отображаются как непрерывная полоса длиной 10 с внизу для анализа ритма, как показано на рисунке 2. Несмотря на то, что большинство записей ЭКГ

на бумаге соответствуют формату 12 отведений (3x4 сегмента + 1 полоса), существуют печатные ЭКГ, которые не придерживаются этого формата [4].

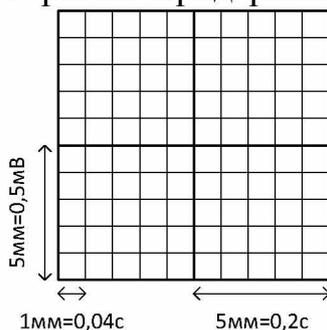


Рисунок 1. Стандартная сетка на распечатанных ЭКГ изображениях.

Процесс оцифровки ЭКГ включает несколько ключевых параметров: длину Т-сегмента ЭКГ (в секундах), частоту дискретизации временного ряда f_s , разрешение сканированного изображения в точках на дюйм (DPI), которое обозначается как D , и амплитудное разрешение, которое в цифровых устройствах ЭКГ связано с разрешением аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и динамическим диапазоном аналогового входа. Понимание этих параметров имеет решающее значение для согласования оцифрованной ЭКГ с исходным временным рядом.

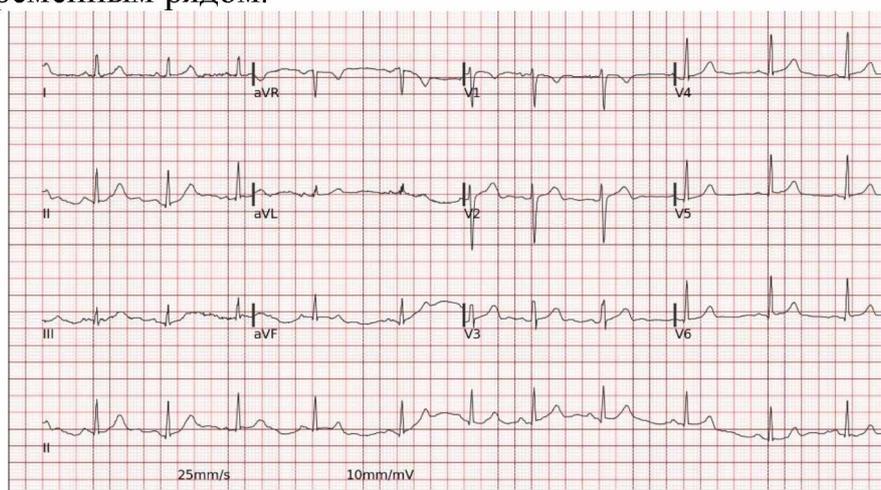


Рисунок 2. Стандартная 12-канальная ЭКГ.

Печать и повторное сканирование ЭКГ включают интерполяцию и повторную выборку. В аналоговых устройствах или принтерах этот процесс преобразует дискретные временные выборки в непрерывную форму сигнала на бумаге. Исходная частота выборки f_s и разрешение АЦП становятся несущественными после печати, поскольку сигнал возвращается к непрерывной форме. После сканирования ЭКГ квантуется и повторно выбирается как двумерное изображение с разрешением D . Каждый квадрат ЭКГ размером 1 дюйм оцифровывается в массив $D \times D$, где каждый пиксель представлен в B битах. Обычно $B = 8$, что дает 24 бита или 3 байта на пиксель.

При сканировании стандартной ЭКГ, напечатанной на бумаге формата A4 или Letter, каждый сегмент размером 1 дюйм соответствует D пикселям. Каждый грубый квадрат ЭКГ (амплитуда 0,5 мВ, время 200 мс) отображается в квадрат

пикселей размером $\left(\frac{5 \times D}{25.4}\right) \times \left(\frac{5 \times D}{25.4}\right)$. Таким образом, разрешение амплитуды отсканированной ЭКГ составляет $dv = \frac{2.54}{D}$ мВ, а временное разрешение – $dt = \frac{1.016}{D}$ с, что приводит к частоте дискретизации на основе изображения

$$\tilde{f}_s = \frac{D}{1.016} \text{ Hz} \quad (1)$$

Как видно, эта частота не зависит от исходной f_s , а увеличение D дает более гладкие формы волн, но не добавляет информации за пределы $\frac{f_s}{2}$. Из (1) можно сделать вывод, что для сохранения типичного спектра ЭКГ, который в основном ниже 100 Гц, рекомендуется разрешение не менее 200 DPI для сканирования и оцифровки ЭКГ.

DPI метаданных файла изображения может быть ненадежным для восстановления разрешений по времени и амплитуде по пикселям. В этом случае алгоритмы оцифровки ЭКГ могут использовать методы, которые напрямую анализируют размеры сетки ЭКГ из изображения, используя методы, которые, например, используют граничные распределения пикселей или спектральные методы для обнаружения регулярных шаблонов сетки ЭКГ.

На последнем этапе, чтобы восстановить временной ряд ЭКГ на его исходной частоте дискретизации, оцифрованный сигнал может быть повторно дискретизирован с \tilde{f}_s обратно в f_s . Это позволяет выравнивать и сравнивать исходный и реконструированный временной ряд. Этот шаг также имеет решающее значение для поддержания целостности данных ЭКГ и измерений на основе ЭКГ, включая интервалы RR и интервалы QT [4].

Список используемых источников

1. Райганян, Р.М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход / Пер. с англ. под ред. А. П. Немирко. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2010. – 440 с. – ISBN 978-5-9221-0730-3.
2. S. Whyte, K. Farhat, K. Sample, R. Barber, A. Vera, A. Shaw, N. Wells-Serrano, J. Xue, D. Albert, and S. Stavrakis, “Clinical validation of a mobile, artificial intelligence-guided, 12-lead ECG device,” Heart Rhythm, vol. 20, no. 5, p. S135, May 2023.
3. A. Luthra, ECG made easy. Jaypee Brothers Medical Publishers, 2019.
4. Kshama Kodthalu Shivashankara, Deepanshi, Afagh Mehri Shervedani, Matthew A. Reyna, Gari D. Clifford, Reza Sameni (2024). ECG-image-kit: a synthetic image generation toolbox to facilitate deep learning-based electrocardiogram digitization. In Physiological Measurement. IOP Publishing. DOI: 10.1088/1361-6579/ad4954