

УДК 004.932.2:004.021

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ЧАСТОТЫ СЕРДЕЧНЫХ СОКРАЩЕНИЙ ПО СИГНАЛУ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ С ПОМОЩЬЮ УМНЫХ ЧАСОВ

В.А. РЕДЖЕПОВ, Д.Ю. ПЕРЦЕВ

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

Аннотация. Рассматривается принцип снятия и анализа электрокардиограммы, полученной с помощью умных часов Apple Watch 6, восстановление сигнала электрокардиограммы из ее изображения, расчет частоты сердечных сокращений был произведен по обнаруженным QRS-комплексам с помощью алгоритма Пана-Томпкинса.

Ключевые слова: частота сердечных сокращений, электрокардиограмма, изображение электрокардиограммы, умные часы, Apple Watch, QRS-комплекс, алгоритм Пана-Томпкинса.

ANALYSIS OF HEART RATE MEASUREMENT RESULTS FROM ELECTROCARDIOGRAM SIGNAL USING A SMARTWATCH

VLADIMIR A. REDZHEPOV, DMITRY Y. PERTSAU

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The principle of recording and analysis of an electrocardiogram obtained using the Apple Watch smartwatch is considered, the electrocardiogram signal is restored from its image, the heart rate is calculated based on the detected QRS complexes using the Pan-Tompkins algorithm.

Keywords: heart rate, electrocardiogram, electrocardiogram image, smart watch, Apple Watch, QRS complex, Pan-Tompkins's algorithm.

Введение

Частота сердечных сокращений (ЧСС) используется в медицинской и спортивной практике как физиологический показатель нормального ритма сердцебиения и является важным признаком для первичного различения нормального ритма сердца и разнообразных нарушений ритма сердца (аритмий). ЧСС – физическая величина, получаемая в результате измерения числа сердечных систол в единицу времени. Традиционно измеряется в единицах: «число ударов в минуту». Методы измерения регистрации ЧСС в основном совпадают с методами регистрации variability сердечного ритма. Количественную оценку ЧСС обычно получают при помощи измерения количества пульсовых ударов в минуту или по количеству желудочковых комплексов на электрокардиограмме (ЭКГ) [1]. Электрокардиография является одним из ведущих методов инструментального исследования сердечно-сосудистой системы, который остается наиболее распространенным и доступным для широкого круга врачей. Этот метод не теряет своего значения и постоянно совершенствуется. Необходимо отметить, что электрокардиограмма (ЭКГ) позволяет успешно диагностировать патологию сердца только в сочетании с анализом данных клинического обследования. Переоценка возможностей электрокардиографии может привести к серьезным диагностическим ошибкам. Вместе с тем четкое понимание причин изменений ЭКГ может оказать неоценимую услугу в распознавании болезней сердца [1].

Методика проведения эксперимента

Стандартную 12-канальную ЭКГ в клинической практике получают, используя четыре отведения от конечностей и грудные отведения в 6 позициях [3]. 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 [4]. Приборы для регистрации ЭКГ в медицинских учреждениях и датчики ЭКГ в фитнес-браслетах и умных часах работают по одному и тому же принципу: электрические потенциалы, возникающие в сердце, воспринимаются электродами, а затем проходят несколько стадий усиления, фильтрации и согласования прежде, чем получить выходной сигнал [5]. Например, не было выявлено [6] существенных различий между данными Apple Watch и 12-канальной ЭКГ в отношении ритма, наличия или отсутствия P-волн, интервала P-R и ширины комплекса QRS. Средняя частота сердечных сокращений на ЭКГ с 12 отведениями составила $72,67 + 13,02$ удара в минуту, в то время как средняя частота сердечных сокращений на ЭКГ Apple Watch – $74,14 + 12,63$ удара в минуту. Корреляция Пирсона показала значительную и очень сильную положительную корреляцию (согласие) между измерениями частоты сердечных сокращений на 12-отведений ЭКГ и ЭКГ Apple Watch. В исследовании были использованы умные часы Apple Watch 6 (таб. 1) [7].

Таблица 1. Характеристика умных часов Apple Watch 6

Параметр	Экран
Экран	Прямоугольный, плоский, AMOLED, 1,57", 324×394 (325 ppi)
Материал	Нержавеющая сталь, титан, керамика, переработанный алюминий
Датчики	Барометрический высотомер постоянного действия, акселерометр нового поколения, гироскоп нового поколения, электрический датчик ЭКГ, оптический датчик сердечного ритма, датчик внешней освещенности, компас, пульсоксиметр (SpO2)
CPU	Apple S6, 2 ядра
Габариты (мм)	40×34×10,7
Аккумулятор (мАч)	Li-Ion, 303,8
Масса (г)	48
Емкость встроенного накопителя (ГБ)	32
Стоимость (BYN)	1159

Пользователь записывает ЭКГ в отведении I, нажимая на заводную головку пальцем руки, противоположной руке с электродом на корпусе часов (рис. 1).



Рис. 1. Процесс снятия ЭКГ с помощью умных часов Apple Watch

Для измерения ЧСС в Apple Watch предназначено отдельное приложение «ЭКГ», а результаты заносятся в приложение «Здоровье». Приложение «ЭКГ» (рис. 2) представляет

собой мобильное приложение, которое используется вместе с часами Apple Watch для создания, записи, хранения, передачи и отображения одноканальной ЭКГ, схожей с ЭКГ в отведении I.

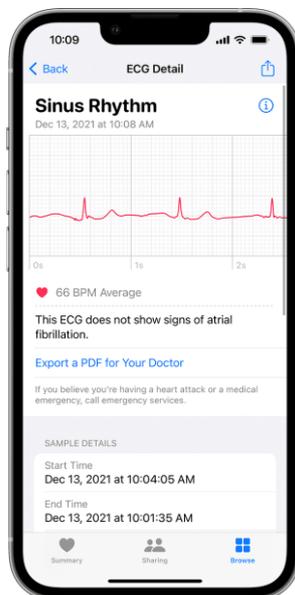


Рис. 2. Приложение «ЭКГ», используемое совместно с часами Apple Watch

Данное приложение классифицирует волну для выявления мерцательной аритмии, синусового ритма и высокого пульса (ситуация, когда при пульсе от 100 до 150 ударов в минуту мерцательная аритмия не выявлена). Использование приложения «ЭКГ» возможно без предварительной консультации с врачом, но не рекомендуется использовать лицам, у которых диагностированы другие виды аритмии. Данные приложения «ЭКГ», которые отображаются на экране, предназначены только для справки. Пользователь не должен анализировать результаты или назначать лечение на их основе. ЭКГ служит дополнительным инструментом классификации нарушений ритма и используется для того, чтобы отличить мерцательную аритмию от синусового ритма [8]. После успешной записи в приложении «ЭКГ» отобразится одна из указанных ниже классификаций ритма:

– *Синусовый ритм.* Сообщение о синусовом ритме означает, что сердечные сокращения регулярны и происходят с частотой от 50 до 99 ударов в минуту.

– *Высокий пульс, мерцательная аритмия не обнаружена.* Сообщение о высоком пульсе означает, что частота сердечных сокращений составляет от 100 до 150 ударов в минуту, а признаки мерцательной аритмии не обнаружены.

– *Мерцательная аритмия.* Сообщение о мерцательной аритмии означает, что сердечные сокращения нерегулярны и происходят с частотой от 50 до 99 ударов в минуту.

– *Мерцательная аритмия, высокий пульс.* Сообщение о мерцательной аритмии и высоком пульсе означает, что сердечные сокращения нерегулярны и их частота составляет от 100 до 150 ударов в минуту.

– *Некачественно снятые показания.* Сообщение о некачественно снятых показаниях означает, что запись не удалось классифицировать из-за слишком большого количества артефактов или шума на электрокардиограмме. Причины могут быть разными. Например, пользователь двигался во время записи или ремешок часов Apple Watch был застегнут неплотно. Для небольшого процента пользователей в связи с их физическим состоянием невозможно создать качественную запись из-за недостаточно сильного сигнала.

– *Низкий или высокий пульс.* Приложение «ЭКГ» не может оценить записи, если частота сердечных сокращений составляет ниже 50 или выше 150 ударов в минуту.

По завершении записи данные ЭКГ анализируются, чтобы определить, составляет ли продолжительность записи не менее 25 с. Если продолжительность записи не менее 25 с., то выявляется синусовый ритм, или высокий пульс при отсутствии мерцательной аритмии, или мерцательная аритмия, или результаты считаются неоднозначными. Результаты записи ЭКГ в

приложении «ЭКГ» содержат подробные данные анализа. Информативные пояснения также будут доступны в приложении «Здоровье» на устройстве iPhone. Сообщение о неоднозначных результатах ЭКГ может означать, что из-за артефактов или шума не удалось получить качественный сигнал или что выявлена аритмия, отличная от мерцательной, но не поддающаяся классификации в приложении. После успешного измерения показывается значение ЧСС и строится график электрокардиограммы. Данные ЭКГ, записанные во время сеанса, сохраняются и при желании могут быть экспортированы в формате изображения (рис. 3). Учитывая, что протокол получения данных, используемый Apple, закрыт для сторонних разработчиков, для последующего автоматизированного анализа данных должен быть восстановлен сигнал ЭКГ в цифровом виде по информации, полученной из изображения.



Рис. 3. Данные в формате изображения, экспортированные из приложения «ЭКГ»

Восстановление сигнала электрокардиограммы из ее изображения

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 такие 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 рис 4. Исторически сложилось так, что калибровочный импульс амплитудой 1 мВ и шириной 0,2 с также печатается на большинстве бумажных ЭКГ [9].



Рис. 4. Фрагмент ЭКГ, полученной с часов Apple Watch 6

Процесс оцифровки ЭКГ включает несколько ключевых параметров: длину T -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. DPI метаданных файла изображения может быть ненадежным для восстановления разрешений по времени и амплитуде по пикселям. В этом случае алгоритмы оцифровки могут использовать методы, которые напрямую анализируют размеры сетки ЭКГ из изображения, используя методы на основе граничного распределения пикселей или спектральные методы для обнаружения регулярных шаблонов. На последнем этапе, чтобы восстановить временной ряд ЭКГ на его исходной частоте дискретизации, оцифрованный сигнал может быть повторно дискретизирован обратно в f_s (рис. 5). 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 [10].

Анализ полученных данных

В результате проведенного исследования были получены ЭКГ-данные с помощью умных часов Apple Watch. Данные, имеющие синусовый ритм, были экспортированы в формате изображения, по которым был восстановлен сигнал в цифровом виде. Также были получены значения ЧСС, которые вычисляются на устройстве непосредственно во время снятия ЭКГ. Для анализа ритма и для мониторингового контроля ЧСС был использован алгоритм Пана-Томпкинса для обнаружения QRS-комплексов (рис. 6). Этот алгоритм состоит из следующей последовательности фильтров и методов: фильтра нижних частот, фильтр верхних частот, оператор производной, возведение в квадрат, интегрирование, адаптивная пороговая процедура и процедура поиска. Промежутки времени между такими последовательными маркерами дают RR-интервалы, которые были усреднены, что представляет собой качественную оценку среднего интервала между комплексами. ЧСС была рассчитана в ударах в минуту, как 60 , деленное на среднее значение RR-интервала в секундах. ЧСС также может быть определена путем подсчета количества комплексов, обнаруженных за определенный период, например за 10 с., и умножения результата на требуемый коэффициент (в данном случае на 6) для получения количества комплексов в одну минуту.

Для того, чтобы понять, насколько восстановленные сигналы ЭКГ пригодны для дальнейших исследований, были вычислены значения ЧСС и выполнен расчет относительных погрешностей измерений (рис. 7). Гистограмма распределения относительных погрешностей вычисленных ЧСС представлена на рис. 8.

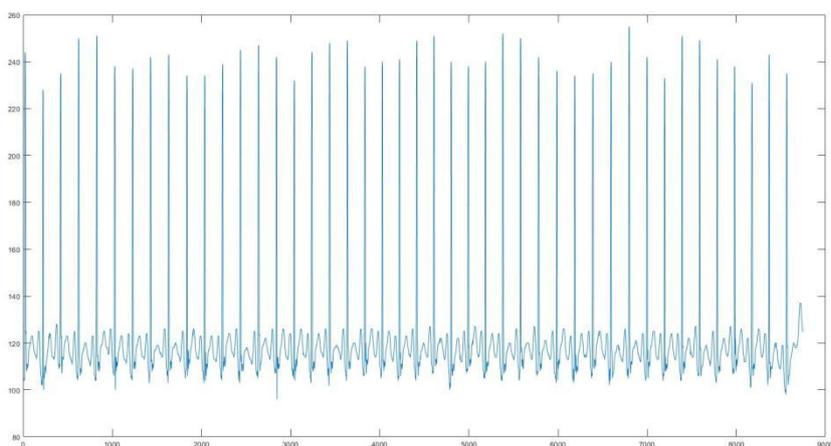


Рис. 5. Восстановленный сигнал ЭКГ, соответствующий изображению на рис.3

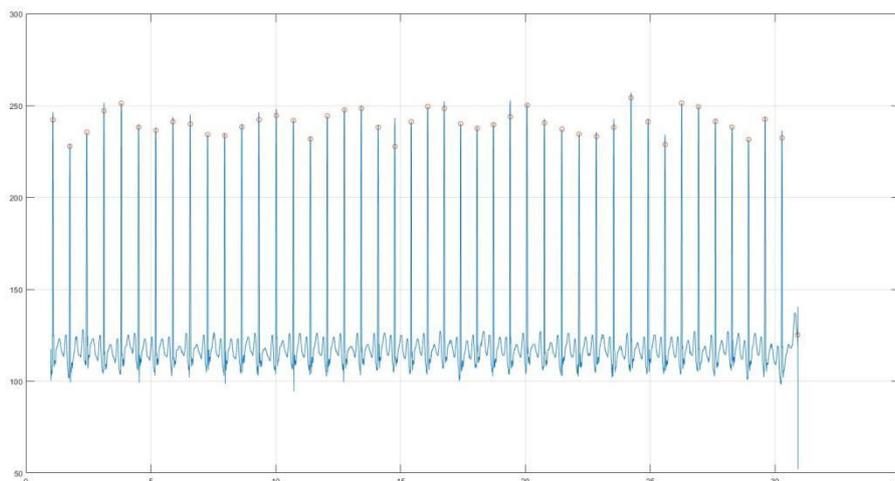


Рис. 6. Найденные QRS-комплексы на ЭКГ, соответствующей изображению на рис.5

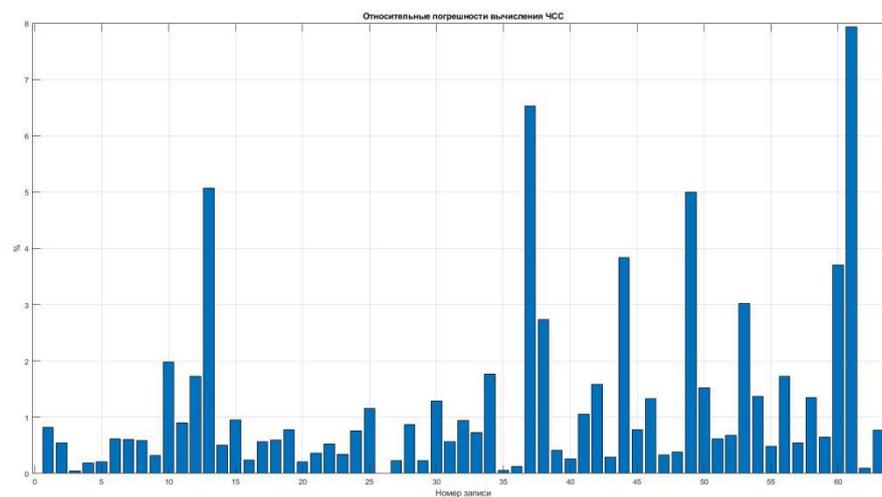


Рис. 7. Диаграмма относительных погрешностей вычисления ЧСС

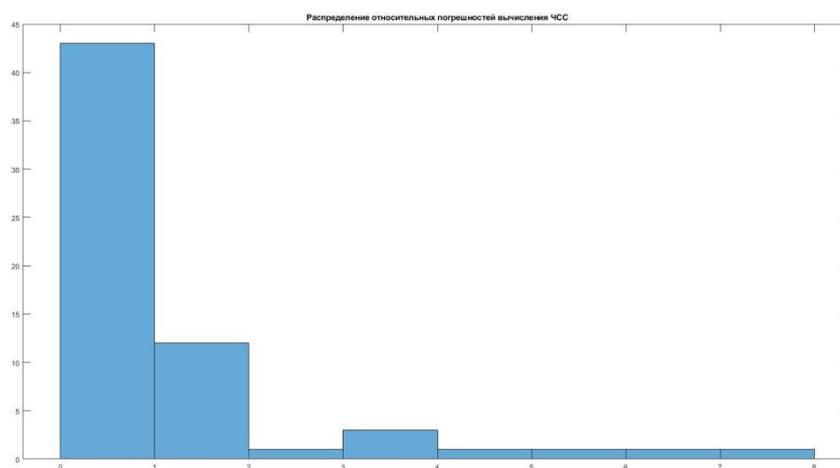


Рис. 8. Гистограмма распределения относительных погрешностей вычисленных ЧСС

Результаты и их обсуждение

В результате проведенного исследования были получены данные ЭКГ с умных часов Apple Watch 6. Данные экспортировались в формате изображений, по которым были восстановлены ЭКГ-сигналы. Был проведен сравнительный анализ между значениями ЧСС, полученных с умных часов и значениями ЧСС вычисленными по восстановленным сигналам ЭКГ. Всего было проанализировано 63 записей. Относительная погрешность вычисления ЧСС для 68% записей составила не более 1%. Для записей, которые имеют относительную погрешность вычисления ЧСС более 2%, имеются двигательные артефакты в ЭКГ-сигнале, которые влияют на расчет ЧСС.

Заключение

Полученные результаты исследования свидетельствуют о том, что, используя данные ЭКГ, полученные с умных часов таких, как Apple Watch, можно вычислить ЧСС с достаточно высокой точностью для оценки состояния пользователя. Также стоит учитывать, что при снятии ЭКГ с помощью умных часов в сигнале могут появляться артефакты, которые снижают точность вычисления ЧСС.

Список литературы

1. Аритмии сердца. Механизмы. Диагностика. Лечение. В 3 томах / Пер. с англ./Под ред. В. Дж. Мандела. – М.: Медицина, 1996. – 10 000 экз. – ISBN 0-397-50561-2.
2. Болезни сердца и сосудов. В 4-х тт. Под ред. Е. И. Чазова. – М.: «Медицина», 1992: Т. 1. – 492 с.
3. 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.
4. 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.
5. Реджепов В. А. Модель электронной схемы для снятия электрокардиограммы на основе микросхемы AD8232 / В.А. Реджепов // *Современные проблемы математики и вычислительной техники* : сборник материалов XIII Республиканской научной конференции молодых ученых и студентов, Брест, 23–24 ноября 2023 г. – Брест: БрГТУ, – 2023. – С 88-92
6. Alnasser S, Alkalthem D, Alenazi S, Alsowinea M, Alanazi N, Al Fagih A. The Reliability of the Apple Watch's Electrocardiogram. *Cureus*. 2023 Dec 1;15(12):e49786. doi: 10.7759/cureus.49786. PMID: 38161560; PMCID: PMC10757793.s
7. Раджабов, Ш. Ф. Анализ результатов измерений сатурации кислорода в крови с помощью умных часов = Analysis of the results of blood oxygen saturation measurements using smart watches / Ш. Ф. Раджабов, С. К. Дик // *Медэлектроника–2022. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии* : сборник научных статей XIII Международной научно-технической конференции, Минск, 8-9 декабря 2022 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; отв. за вып.: М. В. Давыдов. – Минск : БГУИР, 2022. – С. 254–259.
8. Инструкция пользователя: ЭКГ, международная версия 2.0 [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://www.apple.com/legal/ifu/ecg/2-0/ecg-2-0-ru_RU.pdf. – Дата доступа: 18.10.2024.
9. A. Luthra, *ECG made easy*. Jaaypee Brothers Medical Publishers, 2019.
10. Реджепов В.А., Перцев Д.Ю. Восстановление сигнала ЭКГ из ее изображения. Материалы Российско-Белорусской молодежной научно-практической конференции. г. Тамбов, 20 сентября 2024 г.