

Система мониторинга ЭКГ на базе IoT с анализом ИИ в реальном времени

Портативное периферийное устройство для первичной
кардиодиагностики



Аппаратная платформа

Raspberry Pi 5 + AD8232 + Arduino Nano

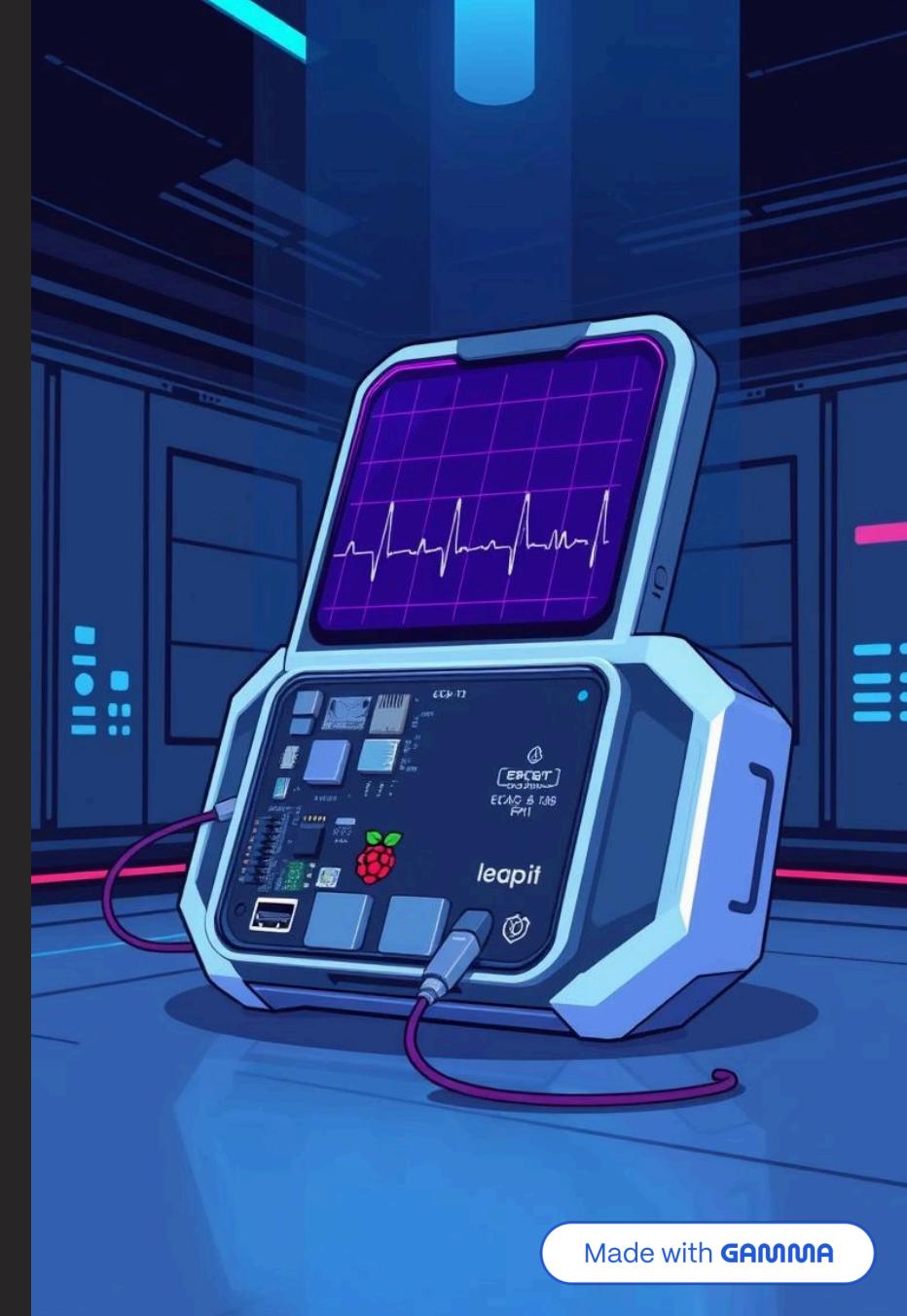


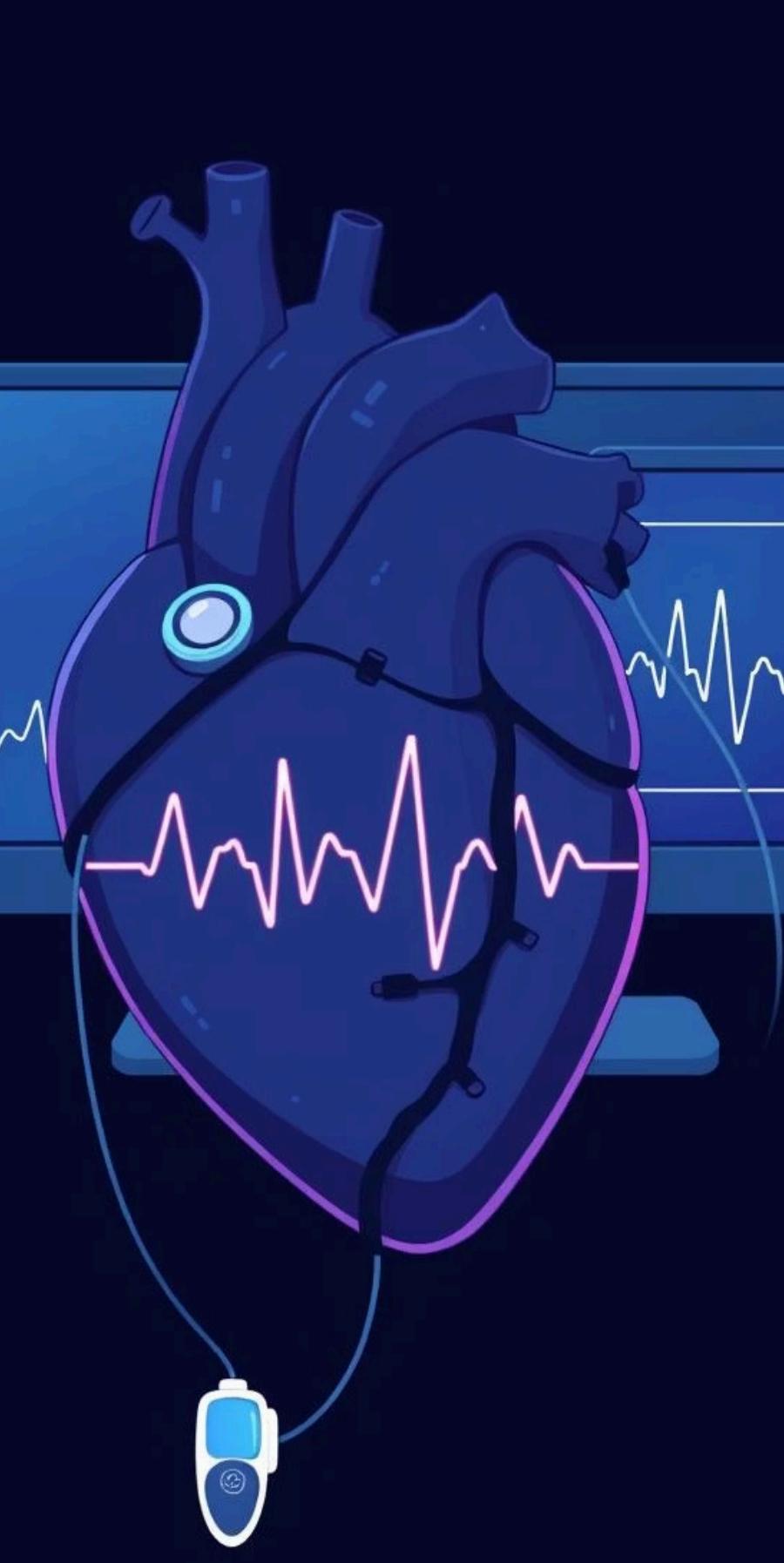
Программный стек

FastAPI, PyTorch, WebSocket, frp

Представил: Михаил Шабарин

16 октября 2025 г., СПбГУ, ПМ-ПУ





Почему это IoT-решение необходимо: Отвечая на острую потребность

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) остаются основной причиной смертности во всем мире. Существующие диагностические методы не удовлетворяют потребности в доступном, непрерывном и своевременном скрининге, особенно вне клинических условий.

Проблема: Традиционные системы ЭКГ

- Стационарное и дорогостоящее оборудование.
- Требуют специализированного медицинского персонала (врачей) для эксплуатации и интерпретации.
- Отсутствие доступа к регулярному скринингу в отдаленных районах и домашних условиях.

Решение: Подход IoT

- **Непрерывный сбор данных:** неинвазивный, долгосрочный мониторинг.
- **Автономная обработка на периферии:** анализ в реальном времени на устройстве.
- **Удаленный доступ:** Результаты доступны мгновенно без сложной облачной инфраструктуры (через frp).

От датчика к интерфейсу: Полная архитектура IoT-системы

Это решение объединяет специализированное оборудование и надежный программный стек для создания автономного комплексного диагностического конвейера.

Уровень датчиков

Границы уровня

Удаленный доступ



Уровень датчиков

- AD8232: Аналоговое получение ЭКГ-сигнала.
- Arduino Nano: Оцифровка на частоте 100 Гц, передача через UART.



Границы уровня (R-Pi 5)

- Прием, фильтрация данных и расчет отведений.
- Локальный вывод ИИ (PyTorch/TorchScript).
- Веб-сервер для визуализации (FastAPI).

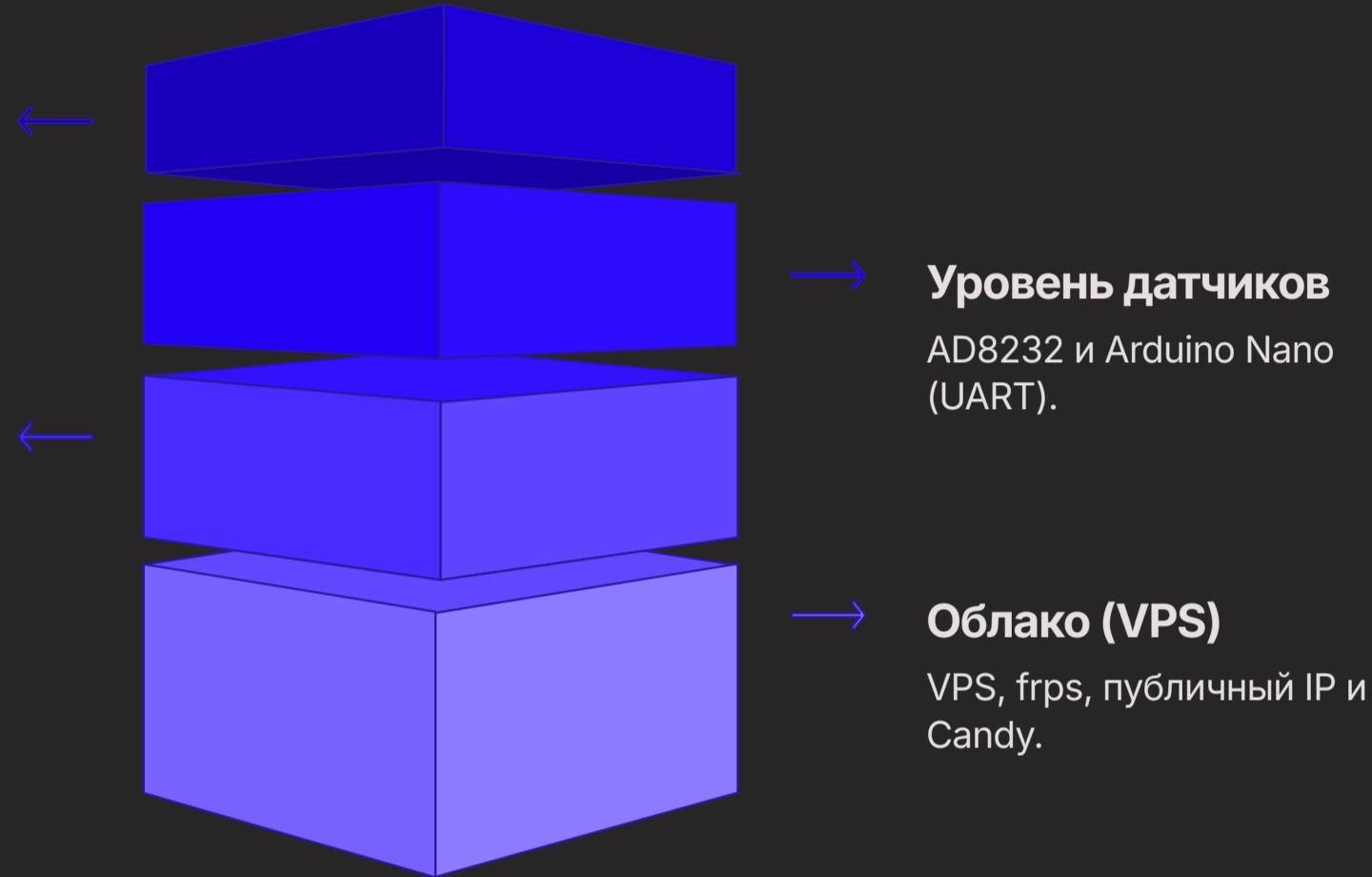


Удаленный доступ

- Проброс портов через **frp (Fast Reverse Proxy)**.
- Обеспечивает безопасное соединение по Public IP без необходимости статического выделения.

Архитектура приложения: Полная схема взаимодействия компонентов

Эта IoT-система охватывает весь путь данных от датчика до конечного пользователя и среды разработки, обеспечивая комплексное решение для мониторинга ЭКГ.



Среда разработки

- Podman**: Контейнеризация приложения.
- Fedora Silverblue**: Операционная система хоста.
- PTB-XL dataset**: Используется для обучения и тестирования модели ИИ.

Уровень датчиков

- AD8232**: Аналоговый датчик ЭКГ.
- Arduino Nano**: Оцифровка сигнала (100 Гц), передача данных по UART.
- Подключение к Raspberry Pi через Serial Monitor.

Границочный уровень (Raspberry Pi 5)

- Обработка данных**: Фильтрация, расчет 12 отведений.
- Модель ИИ**: Локальный вывод на основе PyTorch/TorchScript.
- FastAPI Web Server**: Визуализация данных, WebSocket для данных в реальном времени.
- frpc клиент**: Установка обратного туннеля к VPS.

Облачный уровень (VPS)

- frps сервер**: Прием туннеля от frpc, предоставление доступа.
- Публичный IP**: Доступ к веб-интерфейсу через frp.
- Candy**: Кеширо.

Обработка данных на периферии: Нулевая задержка, максимальная конфиденциальность

Обработка необработанного сигнала непосредственно на Raspberry Pi минимизирует накладные расходы на передачу данных и обеспечивает немедленную обратную связь, что является критически важной функцией для мониторинга в реальном времени.

01

Получение необработанных данных

Прием потоков необработанных сигнальных данных по UART от Arduino.

02

Реконструкция отведений

Расчет 6 стандартных отведений ЭКГ с использованием сложных формул Эйнховена из полученного двухпроводного сигнала.

03

Кондиционирование сигнала

Применение полосно-пропускающей фильтрации (0.5–40 Гц) для удаления дрейфа изолинии и высокочастотного шума.

04

Нормализация и вывод

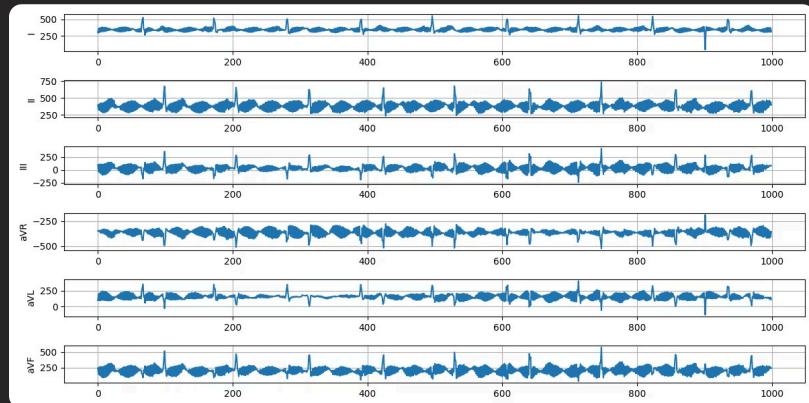
Нормализация данных для соответствия формату набора данных PTB-XL, сохранение в .pru и генерация GIF для визуального контроля.

Ключевые преимущества периферийной обработки:

- Минимизирует объем передаваемых данных.
- Обеспечивает работу **без постоянного доступа к интернету**.
- Повышает конфиденциальность данных, поскольку конфиденциальные медицинские данные не покидают устройство.

Модуль ИИ: Многоклассовая классификация патологий на Raspberry Pi

Основная диагностическая функция обеспечивается сверточной нейронной сетью, оптимизированной для низкопотребляющих граничных вычислительных сред.



Технические характеристики

- Модель: Компактная **Convolutional Network**.
- Данные для обучения: набор данных **PTB-XL** (21 837 исчерпывающих записей ЭКГ).
- Охват: Поддерживает **19 диагностических меток** (аритмии, блокады, синдромы).
- Развёртывание: Экспортировано в **TorchScript** для оптимизированного вывода на CPU.
- Производительность: Время вывода **менее 2 секунд** для 10-секундной записи.

- **Актуальность для IoT:** Возможность автономного и офлайн выполнения сложных диагностических алгоритмов критически важна для развертывания надежных телемедицинских решений в условиях ограниченных ресурсов.

Преодолевая разрыв: Адаптация модели к реальным данным IoT

Качество клинического набора данных (PTB-XL) значительно выше, чем полевые данные с портативных двухканальных датчиков (AD8232). Успешное развертывание модели потребовало стратегической адаптации.

Задача

PTB-XL использует 12 клинических отведений. Наша установка AD8232 предоставляет только 2 отведения с присущими им шумом и характеристиками импульсного сигнала.

Стратегия адаптации

Применение гауссовского сглаживания для лучшего имитирования сложной морфологии волн и использование нормализации амплитуды вместо масштабирования по z-оценке.

Настройка классификации

Снижение порога классификации до **0.1** и смещение акцента с обнаружения «идеальных» меток на выявление наиболее вероятных первичных патологий.

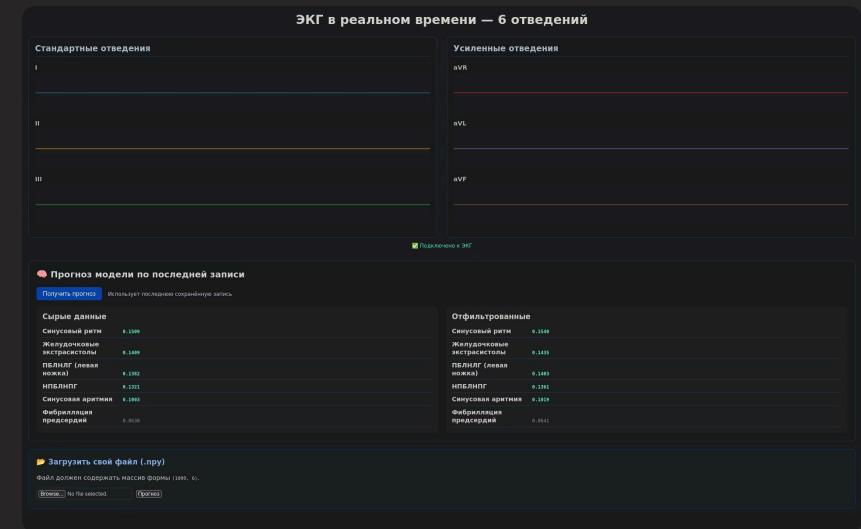
Результатом этих корректировок стала модель, способная давать **интерпретируемые предсказания** даже при подаче уменьшенных 2-канальных данных, что доказывает осуществимость подхода edge-AI.

Веб-интерфейс и удаленный доступ: делаем диагностику доступной

Локальный веб-сервер предоставляет пользовательский интерфейс, а **frp** превращает систему в мощный, удаленно доступный хаб без затрат на статический IP-адрес.

Функциональность веб-сервера (FastAPI)

- Отображение 6 отведений ЭКГ в реальном времени через **WebSocket + Chart.js**.
- Кнопка "Анализировать" в один клик для запуска AI-вывода на последнем записанном сегменте.
- Возможность загружать и анализировать пользовательские файлы .pru.
- Автоматическое хранение 10-секундных записей.



Инфраструктура IoT: frp (Fast Reverse Proxy)

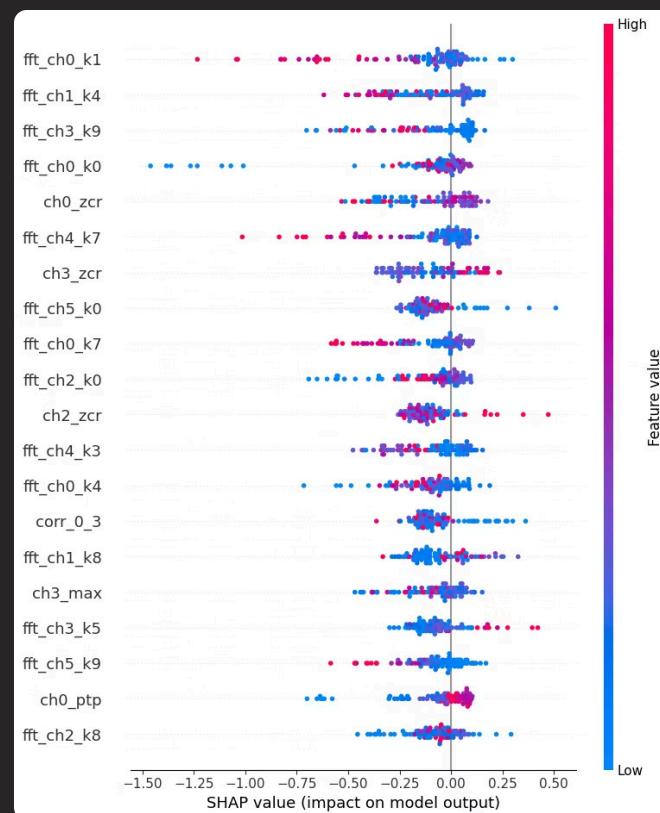
Клиент frpc на Raspberry Pi подключается к серверу frps на VPS, перенаправляя порт 8000. Это обеспечивает доступ через `your-vps:8000`, поддерживая доступ к нескольким службам с одного Virtual Private Server.

Демонстрация работы системы: Практические примеры

На этом слайде мы покажем систему в действии, демонстрируя ее функциональность от получения данных до визуализации и анализа.

Влияние признаков на прогноз модели

Как признаки влияют на выход модели — положительно (красный) или отрицательно (синий). Помогает понять, какие характеристики ЭКГ наиболее значимы для классификации патологий.



Правильное размещение электродов

Визуальное руководство по точному размещению двух электродов AD8232 для оптимального сбора сигнала.



Пример работы системы (видео)

Краткое видео, демонстрирующее полный цикл работы системы — от датчика до веб-интерфейса.



Результаты и текущие ограничения

Проект успешно продемонстрировал жизнеспособный прототип edge-IoT, но его реальное развертывание сталкивается с внутренними техническими трудностями и проблемами качества данных.

✓ Достижения

- Полностью функциональный IoT прототип: Сенсор → Edge → Интерфейс.
- Доказанная локальная возможность AI анализа без использования облачных вычислений.
- Достигнут удаленный публичный доступ через frp без инфраструктуры статического IP.
- Разработана открытая и воспроизводимая аппаратная и программная архитектура.

⚠ Текущие ограничения

- Сниженная диагностическая точность из-за использования 2 отведений по сравнению с 12 отведениями, используемыми в обучающем наборе клинических данных.
- Высокая загрузка CPU на Raspberry Pi, что создает риск перегрева при длительной непрерывной работе.
- Качество сигнала очень чувствительно к качеству контакта электродов и артефактам движения.

Будущее развитие: Преобразование в масштабируемую IoT-платформу

Прототип закладывает основу для надежной, масштабируемой платформы мониторинга здоровья, ориентированной на производительность, целостность данных и совместимость.

→ **Оптимизация на Edge**

Внедрение квантования модели и исследование ONNX Runtime для более быстрого и эффективного инференса на Edge.

→ **Уточнение данных и моделей**

Сбор специализированного набора данных AD8232 для тонкой настройки модели с целью повышения точности полевых данных.

→ **Расширенная аналитика**

Интеграция расчетов вариабельности сердечного ритма (HRV) и частоты сердечных сокращений (HR) для расширения диагностических возможностей.

→ **Пользовательский опыт**

Разработка специализированного мобильного приложения (Flutter/React Native) для замены текущего веб-интерфейса и улучшения удобства использования.

→ **Взаимодействие**

Включение функции экспорта SCP-ECG для обеспечения бесшовной интеграции с существующими медицинскими IT-системами и EMRs.

→ **Поддержка нескольких пользователей**

Масштабирование настройки frp для поддержки нескольких независимых пользователей/устройств, превращая VPS в децентрализованный телемедицинский хаб.

Заключение: IoT для доступного, автономного и интеллектуального кардиомониторинга

Проект успешно подтвердил техническую и практическую осуществимость граничной IoT системы для мониторинга ЭКГ, доказав, что высококачественный скрининг может быть децентрализованным и доступным.

Валидация архитектуры

Мы реализовали **полноценную IoT архитектуру**: датчик → edge → интерфейс → удаленный доступ.

Автономность и конфиденциальность

Система работает **без зависимости от облака**, обеспечивая конфиденциальность данных и минимизируя задержки сети.

Доступность

Решение является **открытым, недорогим (~\$50)** и готовым к масштабированию.

Потенциальные применения

- Сельская телемедицина и домашний уход.
- Образовательные и лабораторные условия для биомедицинской инженерии.
- Персональный скрининг здоровья для пожилых людей и групп риска.

