УДК 004.457

Разработка программно-аппаратной платформы для исследования методов бесконтактного мониторинга по Wi-Fi CSI

Дементьев В.Д., Борсук Н.А.

Калужский филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Развитие систем «умного дома», автоматизации и комплексного мониторинга помещений связано с необходимостью получать информацию о присутствии и активности человека без носимых устройств и постоянного видеонаблюдения. Одним из перспективных направлений является Wi-Fi Sensing – использование беспроводной инфраструктуры в качестве бесконтактного радиочастотного сенсора. В основе подхода лежит анализ Channel State Information (CSI): присутствие и движение человека изменяют условия многолучевого распространения сигнала и, как следствие, характеристики поднесущих Wi-Fi-канала [1, 2].

CSI предоставляет более детальное описание радиоканала, чем интегральный показатель RSSI, и применяется для обнаружения присутствия, распознавания активности, идентификации и локализации человека [2, 3]. Микроконтроллеры семейства ESP32 позволяют получать CSI непосредственно средствами стандартного Wi-Fi-контроллера без специализированного радиочастотного оборудования [4]. Вместе с тем CSI существенно зависит от геометрии помещения, расположения узлов и состояния окружающей среды. Ранее выполненные авторами эксперименты также показали чувствительность результатов к условиям и временной структуре сбора данных, что определило необходимость перехода от отдельных программ к единой воспроизводимой исследовательской среде.

Целью настоящей работы является разработка программно-аппаратной платформы для исследования методов бесконтактного мониторинга помещений по CSI Wi-Fi сигналов, обеспечивающей получение данных с сенсорных узлов ESP32-S3, их передачу и визуализацию в реальном времени, а также формирование основы для последующего сбора датасетов и сравнения алгоритмов машинного обучения.

Система включает сенсорные узлы ESP32-S3, серверную подсистему и веб-клиент. Микроконтроллер выполняет получение исходного CSI и передачу серверу, тогда как фильтрация, извлечение признаков и машинное обучение выносятся на серверную сторону. Узел хранит параметры подключения в NVS, после загрузки подключается к Wi-Fi и активирует механизм получения CSI. Для настройки разработан отдельный механизм конфигурации узлов. Передача выполняется по собственному бинарному протоколу поверх UDP; пакет содержит служебные метаданные, последовательный номер, параметры радиоканала и массив CSI-отсчетов.

Серверная подсистема реализована на Python с использованием FastAPI. Принятый UDP-пакет декодируется, проверяется и преобразуется во внутреннее представление CSI-кадра, после чего данные помещаются в оперативный буфер. Веб-клиент получает поток через WebSocket. Сквозной тракт имеет вид, представленный на рисунке 1:

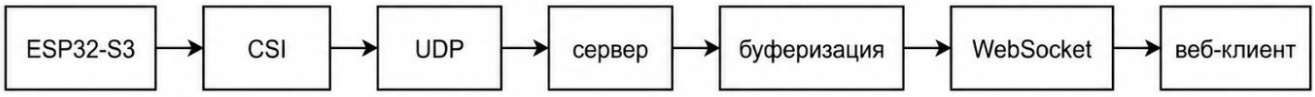


Рисунок 1 – Общая схема функционирования платформы

На текущем этапе реализованы конфигурирование и настройка параметров узла, подключение ESP32-S3 к беспроводной сети, получение CSI, сериализация и передача пакетов, серверный прием и декодирование, буферизация и визуализация амплитудных характеристик CSI, RSSI и интенсивности поступления пакетов в реальном времени.

Следующим этапом является создание подсистем записи экспериментальных сессий и датасетов, предварительной обработки CSI и запуска воспроизводимых ML-экспериментов. В качестве основного прикладного сценария планируется исследование распознавания активности человека со сравнением базовых моделей, LSTM, Bi-LSTM и Transformer. Отдельное внимание будет уделено переносу моделей между помещениями и методам адаптации, поскольку изменение радиочастотной среды способно существенно снижать качество классификации.

Таким образом, разработана архитектура и реализована базовая часть программно-аппаратной платформы Wi-Fi Sensing, объединяющей получение реальных CSI-данных с ESP32-S3, потоковую передачу, серверную обработку и веб-визуализацию. Разделение аппаратного и исследовательского контуров создает основу для воспроизводимого формирования наборов данных, сравнения алгоритмов машинного обучения и дальнейшего применения полученных моделей в системах умного дома, автоматизации и бесконтактного мониторинга помещений.

Список использованной литературы

1. Rakhmanov S.V., Loktev D.A. Wi-Fi signal propagation modeling // 2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – 2025. – DOI: 10.1109/REEPE63962.2025.10971051.
2. Yousefi S., Narui H., Dayal S., Ermon S., Valaee S. A survey of human activity recognition using WiFi CSI. – 2017. – arXiv:1708.07129.
3. Avola D. et al. Transformer-based person identification via Wi-Fi CSI amplitude and phase perturbations. – 2025. – arXiv:2507.12854.
4. Espressif Systems. esp-csi: Applications based on Wi-Fi CSI (Channel State Information) [Электронный ресурс]. – URL: https://github.com/espressif/esp-csi.