

УДК 004.93

Обнаружение изменений в окружающей среде на основе параметров состояния Wi-Fi канала

Рахманов Сергей Владимирович

rakhmanov.sergey@gmail.com

SPIN-код: 3064-2594

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Wi-Fi сигналы окружают нас повсюду — в домах, офисах и общественных пространствах. Чаще всего, Wi-Fi используется для передачи данных, однако, сценарии использования технологии выходят далеко за рамки транспортных. В данной работе представлен механизм обнаружения препятствий и изменений окружающей среды на основе информации о состоянии Wi-Fi радиоканала (CSI). Представленная система анализирует временные и спектральные характеристики радиосигнала, которые позволяют определить наличие объектов. Для оценки точности, в данной работе был проведен эксперимент, в котором предлагаемый метод достиг точности в 96 %, сохраняя низкую вычислительную сложность. Решение работает на базе широкодоступного микропроцессора ESP32 и может быть интегрировано в конвейер рендеринга AR/VR систем, позволяя динамически адаптировать физическую модель помещения и улучшить механизм детектирования коллизий без использования дополнительных датчиков и при недостаточном освещении.

Ключевые слова: распространение Wi-Fi сигнала, спектральные характеристики радиосигнала, временные характеристики радиосигнала, определение объектов, мониторинг окружающей среды, детектирование препятствий

CSI-based detection of environmental changes

Rakhmanov Sergey Vladimirovich

rakhmanov.sergey@gmail.com

SPIN-code: 3064-2594

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. Wi-Fi signals are widely used in homes, offices, and public spaces. While primarily utilized for data transmission, the application scenarios of this technology extend far beyond communication. In this paper, we present a system for detecting physical obstacles and environmental changes based on Channel State Information obtained from Wi-Fi signal. The proposed system analyzes the temporal and spectral characteristics of the radio signal. Perturbations in these characteristics enable the identification of obstacles. To evaluate accuracy, we conduct an experiment in which our method achieved over 96 % accuracy while maintaining low computational complexity. The solution operates on the widely available ESP32 microcontroller and can be integrated into the rendering pipeline of AR/VR systems. This integration allows for dynamic adaptation of the room's physical model and enhances collision detection mechanisms without requiring additional sensors or adequate lighting conditions.

Keywords: Wi-Fi propagation, spectral characteristics of radio signal, temporal characteristics of radio signal, objects detection, environment monitoring, obstacles detection

Введение. Обнаружение препятствий и различных объектов, определение характеристик их движения и классификация — типовые задачи, которые приходится решать различных практических областей, таких как, системы дополненной реальности, системы по типу «умный дом», системы безопасности и другие. В контексте AR/VR систем, стоит отметить, что использование одной лишь камеры не всегда дает всю необходимую информацию об окружении, особенно при слабом уровне освещенности. Традиционные решения, как правило, опираются на специализированные датчики — инфракрасные датчики движения, ультразвуковые датчики расстояния, инфракрасные системы для камер, позволяющие им работать при плохой освещенности. Несмотря на популярность, наличие датчиков, могут утяжелить переносимые устройства, а также вызывают опасения в отношении конфиденциальности, необходимости прямой видимости или ограниченного охвата [1].

В данной работе предлагается использовать Wi-Fi для решения перечисленных проблем. Подход основан на том факте, что сигналы Wi-Fi при распространении в пространстве отражаются, преломляются, затухают и интерферируют в ответ на объекты и движения на своем пути. Изменения в их структуре можно использовать для обнаружения присутствия или движения физических объектов [2, 3]. В данной работе описывается система для обнаружения препятствий с использованием CSI параметра Wi-Fi сигнала. Для предложенной системы в работе проводится эксперимент, демонстрирующий точность классификации, достигающей 96 %.

Материалы и методы. В системах Wi-Fi стандарта IEEE 802.11, беспроводной канал между передатчиком и приемником описывается матрицей комплексных значений, которые показывают амплитуду и сдвиг фазы сигнала на пути между устройствами (CSI). В ряде статей в качестве показателя, характеризующего Wi-Fi соединение, используется индикатор уровня принимаемого сигнала (RSSI) [4]. Однако, RSSI предоставляет только скалярную оценку качества канала, CSI же фиксирует эффекты многолучевого распространения [5], позволяя обнаруживать физические изменения в среде распространения [6].

Система работает в три этапа: сбор данных CSI, извлечение признаков и классификация. Данные CSI собираются в виде комплексных чисел, из которых извлекается набор признаков двух типов: мгновенные (для каждой временной выборки) и временные (использующие скользящие окна).

Мгновенные признаки включают амплитуду и фазу, временные — скользящее среднее по амплитуде $\mu_k(\tau)$, скользящее стандартное отклонение $\sigma_k(\tau)$ и градиент амплитуды первого порядка $g_k(\tau)$:

$$\mu_k(\tau) = \frac{1}{w} \sum_{t=\tau-w}^{\tau} A_k(t),$$

$$\sigma_k(\tau) = \sqrt{\frac{1}{w} \sum_{t=\tau-w}^{\tau} (A_k(t) - \mu_k(\tau))^2},$$

$$g_k(\tau) = A_k(\tau) - A_k(\tau - 1),$$

где $A_k(t)$ — амплитуда, w — оконная функция.

Эксперименты проводились с использованием микросхемы ESP32-S3, работающей в диапазоне 2,4 ГГц, точки доступа Wi-Fi Huawei AX3, датчика препятствий и веб-сервера, служившего для хранения собранных данных.

Результаты. Тестовой средой являлись две офисные комнаты (3 м × 4 м и 3 м × 6 м) со стенами из пеноблока и деревянной дверью между ними. В первом помещении находился чип ESP32-S3, во втором — точка доступа Wi-Fi. В качестве динамического препятствия мы использовали дверь, расположенную между передатчиком и приемником, оснащенную магнитным датчиком.

На этапе сбора данных микросхема ESP32 раз в 30 секунд запрашивала кадр данных CSI. Одновременно с этим у датчика запрашивалась информация о состоянии препятствия. Всего было собрано 962 образца, из которых 495 (51,15 %) относились к классу «без препятствий», а 467 (48,85 %) — к классу «с препятствиями».

В таблице приведены результаты моделей, обученных с использованием амплитуд, фаз и временных признаков. Для классификации мы использовали классификатор Random Forest. Модель, основанная на амплитуде, достигла точности более 85 %, а модель с набором временных характеристик почти 96 %.

Результаты обучения

Набор признаков	Точность	Recall	F1
Амплитуды	0,88	0,88	0,88
Фазы	0,84	0,84	0,84
Временные признаки	0,96	0,96	0,96

Обсуждение. Наши результаты демонстрируют, что облегченный, основанный на признаках подход, использующий исходные данные CSI, может надежно обнаруживать физические препятствия в реальных условиях, и подтверждает, что устойчивое ослабление сигнала, фиксируемое скользящим средним, является основным индикатором наличия препятствий.

Заключение. В данной статье была представлена информационная система для обнаружения препятствий с использованием информации о Wi-Fi канале. Используя временные параметры, такие как скользящее среднее, скользящее стандартное отклонение и градиент, система достигла точности в 96 %, не прибегая к глубокому. Предлагаемый набор характеристик имеет четкое физическое обоснование в виде формул, что позволяет понимать и доверять поведению системы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Рахманов С.В., Локтев Д.А. Обзор методов обнаружения, отслеживания и классификации объектов в ограниченном пространстве. *Промышленные АСУ и контроллеры*, 2024, № 3, с. 38–46.
- [2] Suherman S. Wifi-friendly building to enable wifi signal indoor. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 2018, vol. 7(2), pp. 264–271. <https://doi.org/10.11591/eei.v7i2.871>
- [3] Kavinesh S., Seng Y., Kok Y., Thiruvarasu K. Study of obstacles effect on mobile network and WLAN signal strength. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 2023, pp. 155–161. <https://doi.org/10.24425/ijet.2023.144345>
- [4] Рахманов С.В., Локтев Д.А. Определения заполненности ограниченного пространства с использованием Wi-Fi сигнала. *Интеллектуальные транспортные системы. III Междунар. науч.-практ. конф.: сб. тр. Москва, РУТ (МИИТ), 2024, с. 798–803.*
- [5] Shen L.H., Hsiao A.H., Lu K.I., Feng K.T. Attention-enhanced deep learning for device-free through-the-wall presence detection using indoor WiFi systems. *IEEE National Aerospace and Electronics Conference*, 2019, pp. 1–14. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.13105>
- [6] Likhoedenko A.K., Khokhlov V.K. Algorithm of the parametric tracking system with broadband signals and a modified discriminator. *AIP Conference Proceedings*, 2022, vol. 2383. <https://doi.org/10.1063/5.0075781>