

Шигабутдинов Марат Ильдарович, магистрант, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, г.Казань

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ВНУТРЕННЕГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ WI-FI

Аннотация. В этой статье разбирается работа систем навигации внутри помещений (IPS), которые используют обычные сети Wi-Fi. Сегодня Wi-Fi-трекинг - это удобный инструмент для того, чтобы находить людей и вещи в зданиях, где не ловит сигнал GPS. В работе рассматривается, почему спутниковая навигация не справляется с этой задачей, и как именно Wi-Fi помогает решить проблему. Мы подробно разбираем основные методы расчета координат: от простой оценки мощности сигнала (RSSI) и создания «радиокарт» до точного измерения времени полета радиоволны (ToF). Особое внимание уделяется новым стандартам (IEEE 802.11az, 802.11bk и 802.11bf), благодаря которым привычные роутеры теперь можно использовать не только для выхода в сеть, но и как систему пространственного сканирования. Теперь роутеры могут «видеть» сквозь стены и отслеживать человека (технология Wi-Fi Sensing) без использования смарт-часов или других датчиков. В заключении обсуждаются вопросы безопасности и примеры того, как эта технология уже применяется в медицине, логистике и умных домах.

Ключевые слова: навигация в помещениях, позиционирование, Wi-Fi-трекинг, мощность сигнала, RSSI, радиокарты, время полета, FTM, состояние канала, CSI, Wi-Fi Sensing, машинное обучение, стандарт IEEE 802.11bf.

1. Введение: почему нам нужен Wi-Fi для навигации?

Сегодня трудно представить нашу жизнь без навигации. На улице мы привыкли доверять смартфонам: системы GPS и ГЛОНАСС с высокой точностью

показывают, где мы находимся и куда идти. Но как только мы заходим в большой торговый центр, подземную парковку или на огромный завод, точка на карте начинает «прыгать» или вовсе исчезает.

Почему так происходит? Дело в простой физике. Сигналы от спутников, находящихся в космосе, доходят до Земли очень слабыми. Бетонные стены, железные крыши и стекла с напылением легко блокируют этот сигнал. Кроме того, внутри зданий радиоволны постоянно отражаются от стен и мебели. Этот эффект называется многолучевым распространением (multipath). Из-за него телефон получает сразу несколько отраженных сигналов с опозданием и не может понять, где именно он находится.

Чтобы решить эту проблему, инженеры придумали системы внутреннего позиционирования (Indoor Positioning Systems, IPS). Существует много разных способов находить объекты в помещениях (например, с помощью Bluetooth или радиометок). Но самым удобным и популярным стал Wi-Fi.

Главная причина успеха Wi-Fi-трекинга — это дешевизна и доступность. Wi-Fi роутеры уже установлены почти в каждом офисе, больнице и магазине. Нам не нужно тянуть новые провода или покупать дорогие датчики. Достаточно использовать ту сеть, которая уже есть, чтобы отслеживать перемещения смартфонов или специальных Wi-Fi-меток. Более того, технологии шагнули так далеко, что теперь Wi-Fi может не просто находить телефон, но и улавливать движения самого человека по изменениям радиоволн.

2. Сравнение с другими технологиями: что лучше?

Когда компания решает внедрить навигацию в своем здании, ей приходится выбирать между несколькими технологиями. У каждой есть свои плюсы и минусы:

- **UWB (Сверхширокополосная связь).** Эта технология отправляет очень короткие радиоимпульсы и позволяет определять расстояние с точностью до 10–50 сантиметров. Она невероятно точная и надежная. Но

оборудование для нее стоит очень дорого. Обычно UWB используют на заводах, чтобы промышленные роботы и погрузчики не сталкивались друг с другом.

- **BLE (Bluetooth Low Energy).** Для этой системы по зданию развешивают маленькие маячки (beacons), работающие от простых батареек годами. Точность составляет от 2 до 8 метров. BLE очень популярен в торговле: с его помощью магазины отправляют скидки на телефоны покупателей, проходящих мимо конкретной витрины.
- **RFID (Радиочастотные метки).** Знакомые всем наклейки-чипы на товарах. Точность очень разная (от полуметра до 5 метров). RFID отлично подходит для складов, чтобы быстро сканировать коробки на пропускном пункте. Но для постоянного отслеживания перемещений людей по зданию этот метод не очень удобен.

В отличие от этих вариантов, **Wi-Fi** предлагает золотую середину. Да, раньше его точность была не идеальной (от 1 до 15 метров), но новые протоколы улучшили этот показатель. Главный козырь Wi-Fi - это нулевые затраты на клиентское оборудование (ведь смартфон есть у каждого) и использование уже висящих на стенах роутеров.

3. Как именно Wi-Fi вычисляет координаты?

Чтобы понять, где находится устройство, система должна измерить какой-то физический параметр радиоволны. Инженеры используют четыре основных способа.

3.1. Метод по силе сигнала (RSSI)

Это самый старый и простой способ. RSSI - это показатель уровня принимаемого сигнала. Идея понятна каждому: чем дальше вы отходите от Wi-Fi роутера, тем слабее становится сигнал (падает количество «палочек» на экране телефона).

Математически это падение сигнала описывается логарифмической формулой потерь:

$$RSSI(d) = RSSI(d_0) - 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma$$

Здесь $RSSI(d_0)$ — это сила сигнала на расстоянии ровно в 1 метр от роутера (наша точка отсчета). Буква γ означает коэффициент потерь в воздухе. Если мы находимся в пустом коридоре, он равен примерно 2. А если вокруг много стен и железных шкафов, он возрастает до 3 или 5. Случайная переменная X_σ добавляется в формулу, чтобы учесть резкие скачки сигнала (например, когда между вами и роутером прошел человек).

Узнав примерное расстояние от трех разных роутеров, система чертит три круга. Место их пересечения — это и есть координаты человека (метод трилатерации). Главный минус: сигнал Wi-Fi слишком нестабилен, поэтому точность этого метода хромает (ошибка может достигать 5–15 метров).

3.2. Метод радиокарт (Fingerprinting)

Поскольку формула затухания работает плохо из-за стен и отражений, ученые пошли другим путем. Они решили просто «запомнить» сигнал в каждой точке здания.

Сначала человек (калибровщик) ходит по всему зданию с планшетом. Через каждый метр он останавливается и записывает: «В этой точке сигнал от первого роутера равен -60 дБм, от второго -75 дБм». Так создается огромная база данных, похожая на карту отпечатков пальцев.

Когда обычный пользователь идет по зданию, его телефон тоже ловит сигналы. Система просто берет эти цифры, ищет в базе наиболее похожее совпадение и говорит: «Вы находитесь здесь». Точность получается хорошей (2–8 метров). Но есть огромная проблема: если в комнате передвинуть тяжелый шкаф, радиоволны начнут отражаться иначе, карта устареет, и придется заново обходить всё здание.

3.3. Измерение угла прихода сигнала (AoA)

Современные роутеры имеют сразу несколько антенн. Когда радиоволна от телефона долетает до роутера, она попадает на первую антенну на долю миллисекунды раньше, чем на вторую.

Разница фаз $\Delta\phi$ между двумя антеннами, которые находятся на расстоянии d друг от друга, связана с углом θ , под которым прилетел сигнал:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi \cdot d \cdot \sin(\theta)}{\lambda}$$

где λ — это длина радиоволны. Роутер понимает, с какой именно стороны находится телефон. Если два роутера определяют угол, они смогут найти точку пересечения лучей. Это очень точный метод (1–3 метра), но для него нужны дорогие и сложные антенны.

3.4. Измерение времени полета (ToF / FTM)

Это настоящий прорыв в мире Wi-Fi. Вместо того чтобы мерить слабеющий сигнал, система измеряет время, за которое радиоволна долетает от телефона до роутера и обратно. Поскольку радиоволны летят со скоростью света (c), расстояние d можно легко вычислить.

В стандарте IEEE 802.11mc был описан специальный протокол FTM. Он работает как пинг-понг пакетами данных и засекает четыре точные временные метки:

$$d = c \cdot \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2}$$

Новые алгоритмы, такие как NonFTM, заставляют роутер измерять время сразу на нескольких разных каналах и выбирать самое точное значение. Это позволяет избавиться от помех и получать точность около 30 сантиметров.

4. Зачем здесь нужен искусственный интеллект?

Даже самые лучшие методы ошибаются из-за радиопомех. Чтобы сгладить эти ошибки, сейчас активно используют нейросети и машинное обучение.

4.1. Умное разбиение на зоны

В огромном аэропорту искать нужный «радиоотпечаток» по всей базе данных слишком долго. Поэтому систему учат разбивать здание на крупные зоны с помощью простых алгоритмов (например, гауссовых моделей). Когда телефон делает запрос, ИИ сначала быстро понимает: «Это правое крыло здания», а уже потом подключает сложную модель (например, «Случайный лес»), чтобы найти точное местоположение с точностью до сантиметров.

4.2. Математика сомнений (Конформное прогнозирование)

Раньше алгоритмы всегда выдавали одну точку на карте. Но что, если система не уверена из-за помех? Сегодня ученые используют метод конформного прогнозирования. Вместо одной точки алгоритм рисует на экране кружок или квадрат и говорит: «Я гарантирую на 95%, что человек находится где-то внутри этой зоны». Для опасных производств, где ошибка в координатах может привести к аварии, это крайне важно.

5. Новые стандарты и магия Wi-Fi Sensing

Раньше Wi-Fi-трекинг использовал только параметр RSSI. Но настоящая революция случилась, когда инженеры получили доступ к информации о состоянии канала (CSI). Представьте, что радиоволны — это вода в бассейне. Обычный показатель RSSI просто говорит нам уровень воды. А матрица CSI показывает каждую мелкую рябь и волну на поверхности.

CSI настолько чувствителен, что может заметить, как человек машет рукой или даже как вздымается его грудная клетка при дыхании.

5.1. Точность 802.11az и 802.11bk

Эволюция трекинга привела к появлению стандарта 802.11az, который добавил надежное шифрование данных, чтобы злоумышленники не могли подделать

координаты. Затем, осенью 2025 года, был утвержден стандарт IEEE 802.11bk. Он расширил ширину рабочего канала до 320 МГц. За счет такой широкой полосы оборудование может с невероятной пикосекундной точностью отсеивать лишние помехи, а точность позиционирования начинает приближаться к показателям дорогих UWB-систем.

5.2. Wi-Fi как радар: стандарт 802.11bf

Самым громким событием стал выход стандарта IEEE 802.11bf (WLAN Sensing) в конце сентября 2025 года. Этот документ официально разрешил использовать обычные Wi-Fi роутеры как радары.

Теперь, чтобы отследить человека, ему даже не нужно носить с собой телефон! Любой физический объект, проходящий через зону действия Wi-Fi, оставляет свой след в радиоволнах. Роутер ловит эти изменения и понимает, что в комнате кто-то есть.

6. Где это применяется на практике?

Точная навигация и Wi-Fi радары уже меняют многие сферы нашей жизни:

- **Логистика на заводах:** На ценное оборудование и контейнеры вешают умные Wi-Fi-метки с батареей. Диспетчер на экране в реальном времени видит, где находится нужный станок или палета с грузом. Это спасает от краж и простоев.
- **Торговые центры:** Телефоны покупателей постоянно ищут свободные сети Wi-Fi. Торговый центр собирает эти анонимные запросы и рисует тепловую карту: в каких коридорах больше всего людей, а какие магазины пустуют. Это помогает правильно расставлять товары и планировать аренду.
- **Медицина будущего:** Использование Wi-Fi Sensing - это прорыв в уходе за больными и пожилыми людьми. Обычный роутер в палате с помощью нейросетей может улавливать частоту дыхания спящего пациента или биение его сердца. Если пожилой человек упадет, система по изменению

радиоволн сразу же вызовет скорую помощь, при этом в комнате не нужно ставить камеры, нарушающие личное пространство.

- **Умный дом:** Инфракрасные датчики движения часто ошибаются и реагируют на кошек. Wi-Fi датчики с алгоритмами ИИ способны точно отличить человека от домашнего питомца. Они могут включать свет, регулировать кондиционер в зависимости от того, в какой части комнаты вы сидите, и работать как надежная сигнализация.

7. Заключение

Подводя итоги, можно смело сказать: Wi-Fi больше не является просто способом раздачи интернета. Он превратился в полноценную, умную систему навигации и сенсорики. Переход от простых измерений мощности сигнала к измерению времени полета радиоволны позволил решить главную проблему - помехи от стен.

Новые стандарты 2025 года (802.11bk и 802.11bf) открывают эпоху, когда нам больше не понадобятся смарт-браслеты для контроля за здоровьем дома. Роутеры смогут наблюдать за нами через радиоэфир. В ближайшие годы главными задачами для ученых станут улучшение алгоритмов фильтрации помех с помощью искусственного интеллекта и создание строгих систем защиты данных, чтобы никто не мог использовать эти радары для слежки за людьми без их согласия.

Список литературы

1. Gentile C., Chen J., Moayeri N. Wi-Fi RTT: A Survey of the IEEE 802.11mc Fine Timing Measurement Protocol // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2021. – Vol. 23. – № 4. – P. 2216-2244.
2. Ma Y., Zhou G., Wang S. WiFi Sensing with Channel State Information: A Survey // ACM Computing Surveys. – 2019. – Vol. 52. – № 3. – P. 1-36.

3. Yiu S., Yang S. H. A survey of Wi-Fi based indoor positioning strategies // 2012 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. – 2012. – Vol. 2. – P. 1295-1300.
4. Исичко В. Д., Преображенский А. П. Анализ методов, используемых в задачах внутреннего позиционирования объектов // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2022. – № 1. – С. 15-20.
5. Храбров Д. Е., Мурашко И. А. Методика обучения комплекса Wi-Fi позиционирования // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2021. – № 2. – С. 28-32.
6. IEEE Std 802.11bf-2025. IEEE Standard for Information Technology -- Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks -- Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Amendment 4: Enhancements for Wireless LAN Sensing. – Published: 26 September 2025.
7. Rößler P. et al. Improving FTM Ranging Accuracy with Channel Hopping // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2025.
8. Wu J. et al. Uncertainty-Aware WiFi Indoor Positioning with Conformal Prediction // Sensors. – 2025. – Vol. 25. – P. 100-115.
9. Wang Y., Cao Z., Gong W., Chen M. Survey of deep learning applications in WiFi localization // 2024 IEEE 7th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference. – 2024.
10. Chen X. et al. A Deep Learning Based Lightweight Human Activity Recognition System Using Reconstructed WiFi CSI // IEEE Transactions on Human-Machine Systems. – 2024. – Vol. 54. – P. 68-78.
11. Loginov V. et al. Accurate and Scalable Indoor Localization using Self-Supervised Contrastive Learning with RTT and RSSI (SelfLoc) // Sensors. – 2025. – Vol. 25. – P. 3955.

12. Picazo-Martinez P. et al. 802.11bf Multiband Passive Sensing: Reusing Wi-Fi Signaling for Sensing (MILAGRO framework) // IEEE Internet of Things Journal. – 2025.
13. Quy T. D. et al. Enhanced Wi-Fi Sensing Leveraging Phase and Amplitude of CSI for Superior Accuracy (PA-CSI) // Sensors. – 2025.