

УДК 621.372

doi:10.31799/1684-8853-2025-5-11-21

EDN: AVQGLM

Научные статьи
Articles

Местоопределение узлов Wi-Fi на основе технологии FTM

И. М. Проценко^а, ассистент, orcid.org/0009-0000-4761-1712

В. Н. Малышев^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0001-5011-0337, vm@ieee.org

^аСанкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Профессора Попова ул., 5, Санкт-Петербург, 197376, РФ

Введение: применение технологии IEEE 802.11mc FTM для измерения расстояний и определения местоположения узлов сети находится в стадии активного исследования. Точность оценки расстояний с использованием FTM ограничена рядом факторов, связанных со спецификой распространения сигналов в реальных условиях, аппаратными и программными особенностями узлов. **Цель:** разработать и опробовать практические решения для позиционирования объектов в зданиях и сооружениях на основе технологии FTM, оценить достижимую точность измерения расстояний. **Результаты:** с использованием созданной экспериментальной установки выполнены серии измерений, проведена оценка погрешностей в различных условиях и рассмотрены методы компенсации основных источников погрешностей. Основные источники погрешности разделены на две группы: многолучевое распространение, приводящее к временному рассеянию и искажению оценки времени кругового пути, и аппаратные ограничения, включающие различия тактовых частот, дрейф таймеров, задержки обработки пакетов и квантование временных меток из-за дискретной природы таймеров. Полоса частотного канала влияет на разрешающую способность по времени и не позволяет достичь субнаносекундной точности, необходимой для обеспечения погрешности оценок дистанции порядка сантиметров. В числе основных выводов – ограниченная точность определения расстояний с погрешностью до 1 м при использовании диапазона 2,4 ГГц. Рассмотрены методы математической обработки получаемых данных для снижения погрешностей. **Практическая значимость:** представленный вариант реализации аппаратно-программных средств измерения расстояний по технологии IEEE 802.11mc показал свою эффективность и может быть использован в системах позиционирования объектов в зданиях и сооружениях.

Ключевые слова – позиционирование, местоопределение, дистанция, Wi-Fi, FTM, RTT, время пролета, клиент, точка доступа, фильтр Калмана.

Для цитирования: Проценко И. М., Малышев В. Н. Местоопределение узлов Wi-Fi на основе технологии FTM. *Информационно-управляющие системы*, 2025, № 5, с. 11–21. doi:10.31799/1684-8853-2025-5-11-21, EDN: AVQGLM

For citation: Protsenko I. M., Malyshev V. N. Wi-Fi node location based on FTM technology. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2025, no. 5, pp. 11–21 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2025-5-11-21, EDN: AVQGLM

Введение

Несмотря на большое количество работ на тему определения местоположения людей и объектов в зданиях и сооружениях, где невозможно или неэффективно использовать системы спутниковой навигации, при несомненной актуальности подобных систем позиционирования в самых разных сценариях существующие решения чаще всего не дают достаточных результатов и требуют совершенствования.

Для решения задач позиционирования часто используются беспроводные сетевые технологии. Они различаются по точности, эффективности и имеют различные области применения. В последнее время интенсивно исследуется введенная в спецификации Wi-Fi технологии FTM (Fine Timing Measurement) 802.11mc и 802.11az для измерения расстояний между узлами сети и определения на этой основе местоположения объектов в зданиях и сооружениях [1–3].

К связанным с распространением радиоволн трудностям определения местоположения с малой ошибкой добавляются аппаратные ограни-

чения – не все устройства в настоящее время поддерживают FTM-технологии, рабочие полосы могут составлять 40 МГц или даже 20 МГц, при обработке на узлах Wi-Fi возникают задержки. Программные и интерфейсные ограничения связаны с применением производителями аппаратуры различных версий программного обеспечения (ПО) с неполной реализацией функциональности и доступных настроек.

В условиях прямой видимости, без негативного влияния многолучевости канала можно рассчитывать на погрешность оценки дальности в десятки сантиметров [4]. Дополнительная математическая обработка способна улучшить точность оценки [5, 6].

В работах [3, 7–9] рассмотрены проблемы точности получаемых с помощью FTM результатов, в том числе в условиях многолучевости. Точность получаемых первичных данных не превышает 1,5 м.

В работе [8] представлены результаты экспериментальных исследований применения технологии FTM в помещениях. Результаты статьи были сосредоточены на оценке точности опре-

деления дальности между однородными устройствами Wi-Fi (с сетевыми адаптерами Intel) с незначительными изменениями в настройках сетевых адаптеров, которые также рассмотрены в работе [4]. Показана возможность использования технологии FTM для мониторинга перемещения клиентов в здании. Улучшение точности определения местоположения было достигнуто за счет математической обработки.

Технология CSI (Channel State Information) предоставляет детальную информацию о состоянии радиоканала, включая амплитуду и фазу на каждой поднесущей OFDM-сигнала [6, 7, 9]. Анализ данных CSI позволяет выделить прямую составляющую сигнала (LoS-компоненту) даже в условиях многолучевого распространения, что существенно повышает точность оценки времени пролета (Time of Flight, ToF) при FTM-измерениях. Комбинирование данных FTM с CSI-данными дает возможность:

- идентифицировать и компенсировать влияние отраженных сигналов;
- адаптивно корректировать оценку дальности с учетом текущих характеристик канала;
- снизить погрешность позиционирования до 0,3–0,5 м в LoS-условиях.

Подход особенно эффективен при использовании широкополосных каналов Wi-Fi (80/160 МГц).

В статье рассматриваются характеристики устройств Wi-Fi, поддерживающих спецификации 802.11mc и 802.11az, и возможности их применения для измерения расстояний и определения местоположения узлов. Основными сценариями для использования технологии являются позиционирование объектов в зданиях и сооружениях со стационарным расположением точек доступа, локализация узлов в экстренно или временно развернутых сетях. Ограничениями для использования технологии являются:

- малый темп получения оценок;
- значительная погрешность измерений;
- требования к высокоресурсной постобработке данных.

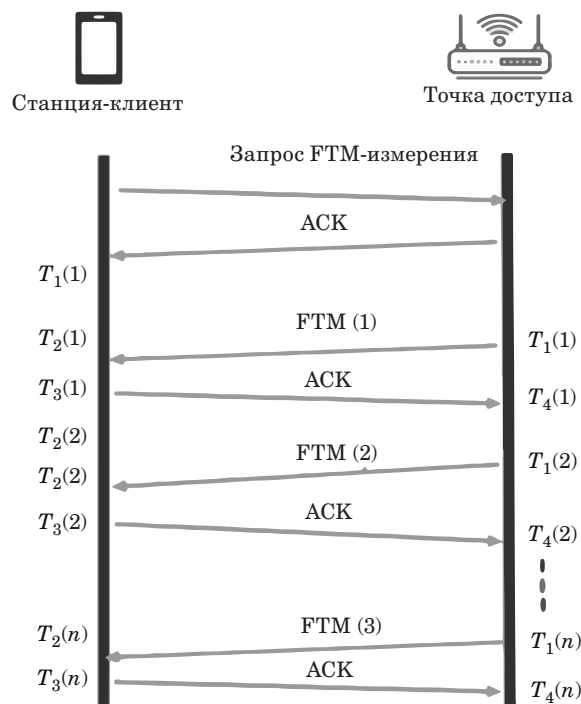
Для каждой из областей применения системы на основе технологии FTM следует учитывать особенности и выбирать соответствующие аппаратно-программные решения и методы обработки. Например, для мало меняющихся условий распространения сигнала в канале целесообразно выбирать двухэтапную обработку с использованием накопленных радиоотпечатков. Для динамически меняющихся условий необходимо реализовывать методы обработки в реальном времени. На основе анализа существующих ограничений технологии FTM сделаны выводы и даны рекомендации к дальнейшему развитию и разработкам.

Представлены варианты выбора технической базы для экспериментального исследования определения расстояний на основе технологии FTM. Произведен анализ применимости протокола FTM для локализации узлов Wi-Fi. Выполнены эксперименты в различных условиях, различных помещениях, сделаны выводы об эффективности применяемой математической обработки.

Выбор аппаратуры и построение экспериментальной установки

Протокол определения дальности IEEE 802.11mc FTM позволяет двум устройствам с асинхронными внутренними часами совместно оценивать расстояние между ними, измеряя время кругового пути (Round Trip Time, RTT) и рассчитывая расстояние по известному значению скорости света. Для измерения RTT станция (инициатор) и точка доступа (ответчик) обмениваются пакетами сообщений друг с другом [10–12]. На рис. 1 представлена схема обмена пакетами для получения информации о времени распространения сигнала от начала обмена T_1 до завершения T_4 . Каждый из пакетов начинается с ACK (Acknowledgement) — подтверждения начала измерения FTM.

Начинающаяся с запроса от инициатора FTM-сессия может включать десятки пар пакетов, со-



■ **Рис. 1.** Схема обмена FTM-пакетами
■ **Fig. 1.** FTM packet exchange diagram

держат метки времени, формируемые на физическом уровне и имеющие разрешение порядка 10 нс. Такая точность оценки RTT и усреднение по десяткам пакетов в рамках FTM-сессии позволяют обеспечить погрешность оценки расстояния порядка одного метра. Точность фиксации времени отправки и прибытия пакетов напрямую влияет на точность определения расстояния, поскольку погрешность в 1 нс может привести к ошибке оценки расстояния в 0,3 м. Поэтому для точности в доли метра необходима точность определения RTT в доли наносекунды.

Свойства канала влияют на характеристики распространения сигнала, погрешность измерения времени также связана с ошибочной оценкой времени обработки. Нестабильность внутренних часов для тактирования каждого устройства вносит дополнительную погрешность в измерение дальности [3, 13, 14].

На практике одной из основных проблем для точного определения расстояния в зданиях и сооружениях по данным FTM является многолучевость канала, что приводит к разбросу оценки RTT в полученных данных.

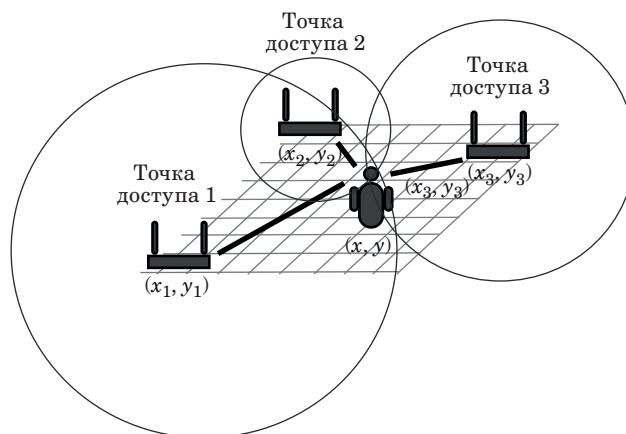
Другим фактором, ограничивающим точность определения времени прихода пакетов, является полоса пропускания канала. Для Wi-Fi различных стандартов полоса будет кратна 20 МГц. Увеличение полосы позитивно отражается на точности измерений, но эта зависимость не является пропорциональной из-за особенностей программной реализации предварительной обработки FTM-пакетов на устройстве. Аппаратные ограничения Wi-Fi-модулей накладывают фундаментальные ограничения на разрешающую способность FTM-измерений (ограниченное быстродействие, конечная точность тактирования, ограниченная полоса обрабатываемого канала) [15]. Конечная полоса пропускания Wi-Fi-каналов (20–160 МГц) и дискретизация сигнала не позволяют надежно различать временные задержки менее 1–2 нс, что соответствует погрешности оценки расстояния ~0,3–0,6 м [3]. В работах [1, 2, 11, 16] рассмотрены меры по устранению ошибки измерений за счет усложнения математической обработки. Такой подход применен и в настоящей работе.

Различные радиотрассы имеют различные профили многолучевого распространения. Этот аспект приводит к вариации погрешности измерений, поэтому затруднительно получить повторяемые и обобщенные результаты для оценки характеристик системы измерения дальности. Кроме того, алгоритмы предварительной обработки данных, реализованные на коммерчески доступных устройствах с поддержкой технологии FTM, не раскрыты. Это затрудняет выбор и оптимизацию методов постобработки [3].

Поскольку в типовых условиях применения технологии FTM — для определения расстояний в зданиях и сооружениях — невозможно избежать многолучевости канала, то возникающие погрешности необходимо корректировать. В работах [1, 2, 4] для повышения точности измерений применяют анализ информации о состоянии канала CSI. Такая дополнительная информация позволяет уточнить получаемые с помощью FTM данные [5, 11].

Используя совместно данные CSI и FTM, можно улучшить характеристики систем позиционирования. Технология FTM, основанная на измерении ToF, обеспечивает оценку расстояния с типовой точностью порядка одного метра, что ограничено такими факторами, как многолучевое распространение и аппаратные задержки. В этом контексте данные CSI, предоставляющие детальную информацию о фазовых и амплитудных характеристиках канала на поднесущих OFDM-сигнала, могут стать ценным дополнением. Анализ CSI-данных позволяет не только выявлять эффекты многолучевого распространения, но и потенциально повышать разрешающую способность измерений, особенно при использовании широкополосных режимов работы Wi-Fi-узлов (до 160 МГц и более в Wi-Fi 6 и Wi-Fi 7).

Особый интерес представляют гибридные методы, сочетающие FTM с технологией радиопечатков (Radio Fingerprinting). В сложных условиях, характерных для офисных или промышленных помещений, такой подход может реализовываться в два этапа. На первом этапе выполняется грубая оценка расстояния с помощью FTM, что иллюстрируется на рис. 2, где показана схема трилатерации с использованием нескольких точек доступа. На втором этапе происходит уточнение позиции путем сопоставле-



■ **Рис. 2.** Позиционирование на основе радиопечатков
■ **Fig. 2.** Radio Fingerprinting positioning

ния текущих данных с заранее собранной базой эталонных радиоотпечатков (CSI-профилей или картой уровней RSSI), как продемонстрировано в работах [12, 17].

Использование нескольких точек доступа позволяет определять позицию клиентского узла с помощью радиоотпечатков и трилатерации.

Перспективы применения таких комбинированных методов особенно актуальны для динамических сценариев, включая мониторинг оборудования, управление IoT-устройствами в умных помещениях и навигацию мобильных роботов. Совместное использование FTM, CSI и радиоотпечатков способно снизить погрешность определения расстояния до уровня десятков сантиметров, что существенно расширяет практические возможности технологии.

Экспериментальная установка на базе микросхем семейства ESP32

Для построения экспериментальной установки и проведения экспериментов рассмотрены различные категории устройств, доступных на рынке:

- мобильные устройства (Samsung Galaxy, Google Pixel и т. д.) с сетевыми адаптерами, поддерживающие технологию FTM;
- программируемые устройства с Wi-Fi-чипом (Raspberry Pi, AVR Lex, ESP32).

Предпочтение отдано платформам на базе микросхем семейства ESP32, поскольку они позволяют осуществить детальный контроль над конфигурацией системы. Кроме того, для этих платформ доступны библиотеки API модулей Wi-Fi, утилиты контроля трафика и мониторинга сети, что делает возможным использование разнообразного открытого ПО совместно с устройствами на базе ESP32.

Устройства ESP32 поддерживают стандарты 802.11 b/g/n, полосу частот Wi-Fi 20 и 40 МГц; гибко программируются с использованием среды разработки кода ESPIDIF IDE или ESP IDE; их стоимость меньше по сравнению с альтернативными. Схожую конфигурацию для построения экспериментальных установок используют во многих работах [2, 4, 17].

Данные FTM, полученные с устройства, — это предобработанные ПО отсчеты работы сессии FTM:

FTM session with Frame Count 8 and Burst Period 1000 ms;

2024-10-15: FTM Estimate: Distance: 4.35 m, Return Time: 29 ns.

Основной информацией является оценка дистанции между двумя узлами по усредненным данным FTM-сессии. Дальнейшая ма-

тематическая обработка и накопление данных позволяют повысить точность измерений. Конфигурационные параметры FTM доступны для настройки, что является отдельным и дополнительным предметом для исследования. Так можно варьировать количество запросов в FMT-сессии, период опроса.

Выбранные устройства позволяют получать информацию об уровне принятого сигнала (RSSI), а также о состоянии канала (CSI), что в сложных условиях распространения сигнала может быть использовано для повышения точности оценки расстояний. Данные CSI представляют собой комплексные коэффициенты передачи канала (включая амплитудную и фазовую характеристики) для каждой поднесущей OFDM-сигнала, что эквивалентно оценке импульсной характеристики канала в частотной области. Эти данные позволяют применять методы цифровой обработки сигналов для компенсации эффектов многолучевого распространения и уточнения оценки RTT, потенциально обеспечивая точность позиционирования порядка десятков сантиметров. Таким образом, оценка расстояния с использованием данных FTM и CSI может применяться в таких сценариях, как позиционирование внутри помещений, роботизированная навигация и автоматизация умного дома, где критически важна точная информация о местоположении [18–20].

Для экспериментальной установки разработано ПО, включая прошивки устройств ESP32S2 и средства постобработки, с возможностью изменять конфигурационные параметры и выдавать выходные данные измерений в необходимом формате. ПО включает алгоритмы формирования FTM-запроса, обработки подтверждений, обработки исключительных ситуаций в ходе работы узла, добавления дополнительной информации в выходные данные (временные метки, RSSI и др.).

Организация экспериментальных исследований

Для проведения экспериментов выбраны идеализированные условия (безэховая камера) и более реалистичная ситуация размещения в коридоре здания. Экспериментальная установка реализует двухточечную схему клиент — точка доступа. Для проведения измерений дальности используются устройства на базе ESP32s2 и ESP32c3 (рис. 3): одно — в качестве точки доступа, другое — в качестве клиента. Клиентских устройств может быть несколько. ПК в данной схеме применяется для последующей обработки, хранения, отображения данных. Структура экс-



■ **Рис. 3.** Аппаратура экспериментальной установки на базе ESP32s2

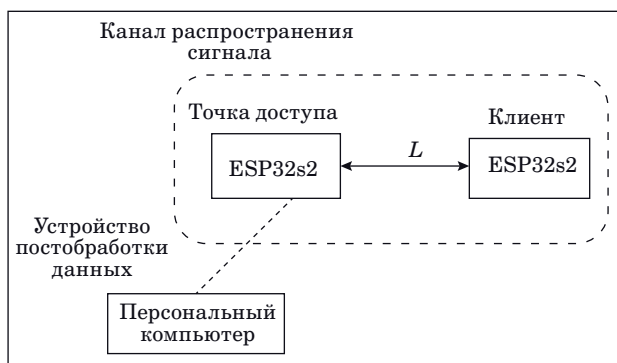
■ **Fig. 3.** Experimental setup hardware based on ESP32s2

периментальной установки показана на рис. 4. Схожая конфигурация системы для проведения измерений применена в ряде работ [2–4].

Узел-точка доступа располагается стационарно, а узлы-клиенты перемещаются на различные позиции для оценки влияния вариаций геометрии на свойства канала.

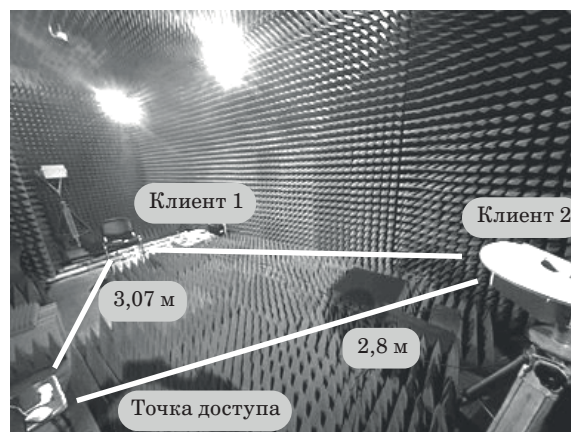
При проведении измерений в безэховой камере (рис. 5) минимизируется эффект многолучевости и влияние внешних помех на результаты, но в то же время эти измерения содержат погрешности, связанные с работой аппаратуры и ПО.

Получаемые распределения (рис. 6) не подчиняются гауссову закону. Соответственно, математическое ожидание может не давать лучшую оценку расстояния. Для построения гистограммы использовано 4200 отсчетов, полученных за фиксированный, непрерывный промежуток времени. Из рис. 6 видно, что распределение смещено по отношению к истинному значению, имеет выбросы и затянутые хвосты, что требует цензурирования. Подобное распределение свидетельствует о значительных погрешностях в серии данных, которые обусловлены аппарат-



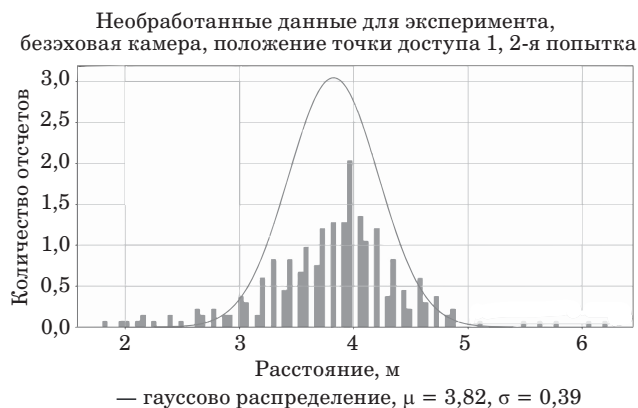
■ **Рис. 4.** Структура экспериментальной установки для измерения расстояний между узлами

■ **Fig. 4.** Distance-measuring equipment and the test-bed



■ **Рис. 5.** Пример расположения узлов в безэховой камере

■ **Fig. 5.** Example of the arrangement of nodes in an anechoic chamber



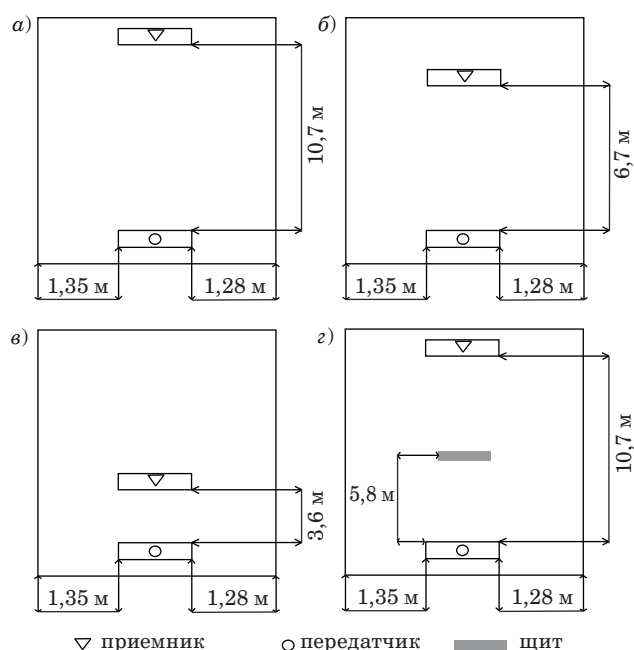
■ **Рис. 6.** Гистограмма распределения оценки дальности от точки доступа до клиента по полученным FTM-данным

■ **Fig. 6.** Histogram of the distribution of the range estimate from the access point to the client based on the values obtained by FTM

но-программными особенностями применяемой аппаратуры.

Для анализа результатов в помещении была выбрана конфигурация протяженного коридора. Варианты размещения аппаратуры представлены на рис. 7, а–г. Клиент и точка доступа были расположены на высоте 90 см над уровнем пола. В варианте на рис. 7, г между клиентом и точкой доступа установлен вертикальный металлический экран. Общий вид представлен на рис. 8.

Данные CSI для положения по рис. 7, а (рис. 9) свидетельствуют о значительном влиянии свойств трассы [18, 19]. Эксперименты включали накопление нескольких тысяч отсчетов значений расстояния от клиента до точки доступа. На рис. 10, а представлена гистограмма распределения оценки дальности с наложенной



■ **Рис. 7.** План расположения аппаратуры в помещении: а — на максимальном расстоянии; б — с запасом расстояния от задней стены; в — вблизи точки доступа; г — на максимальном расстоянии от дальних стен, с металлическим экраном посередине

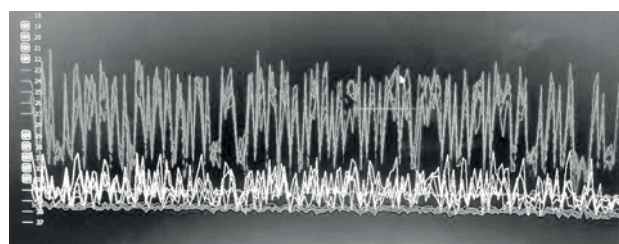
■ **Fig. 7.** Layout plan: а — at maximum distance; б — with extra distance from the client's rear wall; в — near the access point; г — at maximum distance near the far walls, with a metal screen in the middle



■ **Рис. 8.** Расположение аппаратуры при эксперименте
 ■ **Fig. 8.** Arrangement of equipment in the experiment

кривой распределения Гаусса для положения на рис. 7, б. В серии использовано 3300 полученных отсчетов.

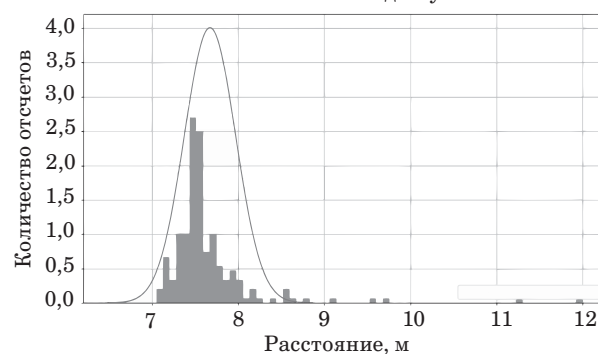
Как видно из рис. 10, а и б, полученные в помещении данные сильно отличаются по качеству от данных, полученных в безэховой камере. Так,



■ **Рис. 9.** Зависимость амплитуды сигнала от времени по поднесущим
 ■ **Fig. 9.** Dependence of signal amplitude on time by subcarriers

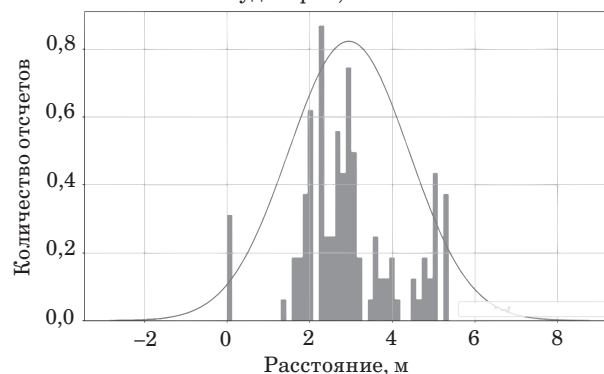
на рис. 10, б наблюдается появление нескольких пиков на распределении с увеличенными по отношению к истинным значениям оценкам дистанции от клиента до точки доступа. Представленные на рис. 10, б серии данных по-

а) Необработанные данные для эксперимента, коридор, положение точки доступа 2



— гауссово распределение, $\mu = 7,67$, $\sigma = 0,3$

б) Необработанные данные для эксперимента, аудитория, 3-я попытка



— гауссово распределение, $\mu = 2,95$, $\sigma = 1,46$

■ **Рис. 10.** Гистограмма распределения оценки дальности до клиента от точки доступа по полученным FTM-значениям: а — для положения на рис. 7, б; б — для положения на рис. 7, в

■ **Fig. 10.** Histogram of the distribution of the estimated distance to the client from the access point based on the values obtained by the FTM: а — for the position in Fig. 7, б; б — for the position in Fig. 7, в

падают в диапазоны величин оценки меньших расстояний и существенно превышающих реальное расстояние до клиентского устройства. Также наблюдается значительное количество выбросов.

Для подобных серий данных следует применять цензурирование оценок. Методология принятия решения об исключении оценки из набора данных может быть основана на анализе частоты появления исключительных значений и длины их последовательности [20, 21].

Многоэкстремальный характер данных может свидетельствовать о значительном влиянии переотражений сигнала, при которых узлы производят оценку дальности по нескольким путям распространения радиоволн (с отражениями от стен, пола и потолка).

Для уточнения местоположения по информации о дальности можно использовать массив или оркестр точек доступа с совместной обработкой дополнительной информации как по прямым измерениям дальности, так и по состоянию канала.

Анализ и постобработка экспериментальных данных

В контексте задач позиционирования алгоритм фильтра Калмана работает в два этапа: на этапе предсказания вычисляется ожидаемое положение объекта на основе предыдущих оценок, а на этапе коррекции это предсказание уточняется с учетом новых измерений дальности, полученных по технологии FTM.

Ключевое преимущество фильтра Калмана при обработке FTM-измерений заключается в его способности учитывать как погрешности измерений, так и неточности модели. Это особенно важно в условиях многолучевого распространения сигналов Wi-Fi, где отдельные измерения могут содержать значительные выбросы [8, 12, 22, 23].

В общем виде формулу для линейного фильтра Калмана для дискретного во времени сигнала можно записать как

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + \frac{P_k}{\delta_k^2} \cdot (z_k - \hat{x}_{k-1}), \quad (1)$$

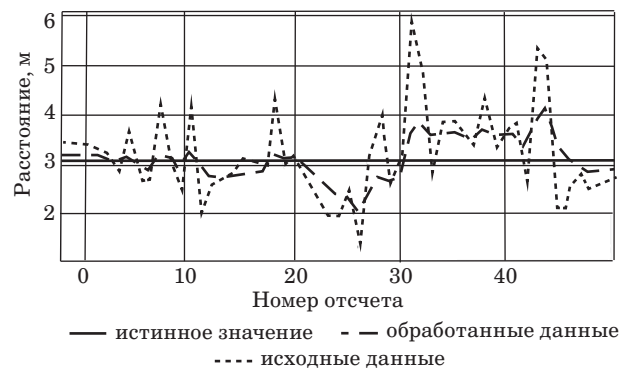
где z_k — это наблюдение в k -й момент времени, а $\hat{x}_k$ — накопленная оценка состояния в k -й момент времени; переменная P_k является ошибкой оценивания и может быть рассчитана по формуле

$$P_k = \frac{P_{k-1} \cdot \delta_k^2}{P_{k-1} + \delta_k^2}. \quad (2)$$

Несмотря на существенное отличие получаемых распределений от гауссова, применение

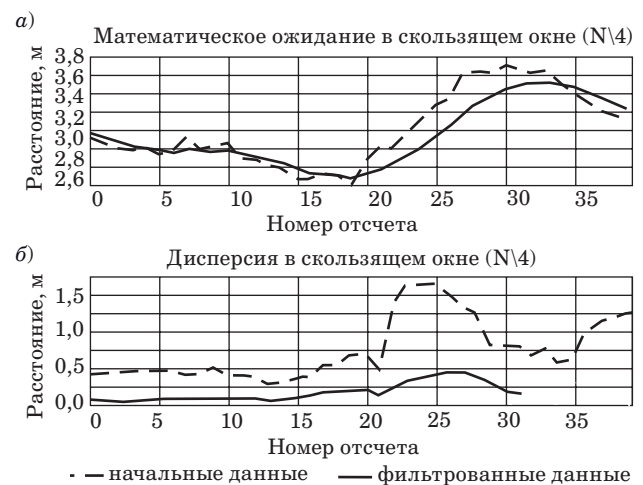
фильтра Калмана для обработки FTM-измерений позволяет эффективно компенсировать случайные и систематические ошибки за счет рекуррентного уточнения оценки состояния. Используя прогнозирование на основе предыдущих измерений (1) и динамическую коррекцию дисперсии ошибки (2), алгоритм обеспечивает устойчивую оценку расстояния даже в условиях нестабильного канала связи. Этот подход особенно эффективен в сочетании с дополнительными методами фильтрации, что подтверждается экспериментальными результатами, представленными ниже.

Данные, накопленные в ходе проведения экспериментов в безэховой камере (см. рис. 6), были подвергнуты обработке фильтром Калмана. Результаты показаны на рис. 11 и 12.



■ **Рис. 11.** Оценка дальности после обработки фильтром Калмана отсчетов, полученных в безэховой камере

■ **Fig. 11.** Estimation of range after processing the readings obtained in the anechoic chamber using the Kalman filter



■ **Рис. 12.** Математическое ожидание в скользящем окне для измерений в безэховой камере: положение 1 (а) и положение 2 (б) на рис. 5

■ **Fig. 12.** Mathematical expectation in a sliding window for measurements in an anechoic chamber: position 1 (a) and position 2 (b) in Fig. 5

Эксперименты показали, что вариативность получаемых данных FTM обусловлена не только свойствами радиоканала (условия безэховой камеры практически исключают многолучевость и влияние внешних помех), но и аппаратными особенностями устройств. В частности, наблюдается значительный разброс в количестве получаемых FTM-оценок за фиксированные временные интервалы. Целесообразно оптимизировать алгоритмы обработки FTM-кадров на уровне сетевых интерфейсов, чтобы улучшить темп получения данных. Как многоэтапная обработка на приемопередающем устройстве, так и постобработка на персональном компьютере — это ресурсоемкие процессы, которые не могут быть реализованы во всех сценариях применения системы.

При необходимости применения многоэтапной обработки целесообразно использовать подход на основе радиоотпечатков, предложенный в работах [1, 11].

В экспериментах внутри помещения (рис. 13) полученные результаты заметно искажаются вследствие эффекта многолучевости. При наличии металлического экрана между узлами оценки дальности искажаются также из-за блокирования прямого пути. Подобная оценка подтверждена в работах [3, 4]. Даже при высоком разрешении внутренних счетчиков и высокой пропускной способности канала дальномерные системы страдают от переоценки расстояния при блокировании прямой видимости [3]. Также в работах [3, 4] подчеркнуто, что применение CSI-информации может улучшить оценку дальности.

Представленные на рис. 11 и 12 данные демонстрируют уменьшение ошибки с 0,75 до 0,42 м. Для характерных многоэкстремаль-

ных распределений в целях уточнения оценки дальности целесообразно применить метод MUSIC. Дальнейшее улучшение точностных характеристик возможно с использованием информации CSI в совокупности с данными FTM.

Заключение

Рассмотрены возможности практического применения технологии FTM, представленной в стандартах Wi-Fi 802.11mc и 802.11az, для задач измерения расстояний и позиционирования беспроводных узлов. Основное внимание уделено анализу точности получаемых оценок дистанций между узлами Wi-Fi и практическим ограничениям, связанным с аппаратно-программной реализацией, а также методам повышения точности. Основными нишами для использования технологии являются задачи позиционирования объектов в зданиях и сооружениях при стационарном размещении точек доступа, а также в условиях экстренного развертывания сетей на территориях.

Результаты тестирования предложенных аппаратно-программных решений и экспериментов показали, что применение FTM-технологии позволяет определить местоположение узлов Wi-Fi с точностью до 1,5 м. В благоприятных условиях погрешность может составлять десятки сантиметров. Результаты, полученные с применением стандарта IEEE 802.11mc, подвергались математической обработке. Основой для проведения экспериментов стали доступные, гибко конфигурируемые устройства на базе ESP32s2 и ESP32c3 диапазона 2,4 ГГц с ограниченным быстродействием и полосой частот канала до 40 МГц. Для повышения точности использовалась математическая обработка данных, включающая цензурирование данных и статистический анализ временных рядов. Применение алгоритмов сглаживания (включая адаптивные методы) позволило снизить влияние многолучевого распространения.

Представленный вариант выбора технической базы — широко распространенных Wi-Fi-устройств — и реализации аппаратно-программных средств измерения расстояний показал свою эффективность и может быть использован в системах позиционирования объектов в зданиях и сооружениях. В ходе выполнения экспериментов подтвержден вывод об эффективности методов математической обработки и необходимости их совершенствования. Дополнительные возможности аппаратуры позволяют осуществить мониторинг состояния среды и активности узлов сети.



■ **Рис. 13.** Оценка дальности после обработки отсчетов фильтром Калмана, полученных в помещении

■ **Fig. 13.** Range estimation when filtering readings obtained indoors using the Kalman filter

Финансовая поддержка

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме «Мультимодальный комплекс контроля воздушного пространства аэропорта» (Соглашение о предоставлении субсидии федерального бюджета на развитие кооперации государственного на-

учного учреждения и организации реального сектора экономики в целях реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства № 075-11-2025-023 от 27.02.2025 г.) и в рамках Постановления Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218. Работа выполнена на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)».

Литература

1. Xu S., Wang Yu., Si M. A two-step fusion method of Wi-Fi FTM for indoor positioning. *Sensors*, 2022, vol. 22, iss. 9. doi:10.3390/s22093593
2. Hashem O., Harras K. A., Youssef M. Accurate indoor positioning using IEEE 802.11mc round trip time. *Pervasive and Mobile Computing*, 2021, vol. 75, Article 101416. doi:10.1016/j.pmcj.2021.101416
3. Vales V. B., Fernández O. C., Domínguez-Bolaño T., Escudero C. J., García-Naya J. A. Fine time measurement for the Internet of Things: A practical approach using ESP32. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, vol. 9, iss. 19, pp. 18305-18318. doi:10.1109/JIOT.2022.3158701
4. Namee K., Srikamta N., Kaewkajone T., Thierchot T., Polpinij J., Kaewsangon R. Enhancing indoor positioning accuracy: A comprehensive study on euclidean distance, trilateration, Wi-Fi RTT and FTM. *CIIS 2023: 2023 the 6th International Conference on Computational Intelligence and Intelligent Systems*, Tokyo, November, 2023. doi:10.1145/3638209.3638235
5. Xie Y., Li Z., Li M. Precise power delay profiling with commodity Wi-Fi. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2019, vol. 18, iss. 6, pp. 1342-1355. doi:10.1109/TMC.2018.2860991
6. Schepers D., Singh M., Ranganathan A. Security analysis of Wi-Fi fine timing measurement. *WiSec '21*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, June 28-July 2, 2021. doi:10.1145/3448300.3467828
7. Wang Z., Guo B., Yu Z., Zhou X. Wi-Fi CSI-based behavior recognition: From signals and actions to activities. *IEEE Communications Magazine*, 2018, vol. 56, iss. 5, pp. 109-115. doi:10.1109/MCOM.2018.1700144
8. Aggarwal S., Sheshadri R. K., Sundaresan K., Koutsounikolas D. Is Wi-Fi 802.11mc fine time measurement ready for prime-time localization. *ACM MobiCom '22: The 28th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Sydney, NSW, Australia, October 17-21, 2022. doi:10.1145/3556564.3558234
9. Кокорева Е. В., Костюкович А. Е. Результаты натурных испытаний системы определения местоположения в сети Wi-Fi. *Экономика и качество систем связи*, 2021, № 3, с. 64-65. doi:10.7256/2454-0714.2024.4.72107, EDN: EWYYZC. <https://journal-ekss.ru/> (дата обращения: 13.10.2024).
10. Мальцев А. А., Масленников Р. О., Хоряев А. В. Влияние фазового шума на OFDM-системы передачи данных. *Изв. вузов. Радиофизика*, 2010, т. 53, № 8, с. 528-529. EDN: NBRBKR
11. Ibrahim M., Liu H., Jawahar A., Nguyen V., Gruteser M., Howard R., Yu B., Bai F. Verification: Accuracy evaluation of WiFi fine time measurements on an open platform. *MobiCom'18*, New Delhi, Oct 29-Nov 2, 2018. doi:10.1145/3241539.3241555
12. Li X., Pahlavan K. Super-resolution TOA estimation with diversity for indoor geolocation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004, vol. 3, iss. 1, pp. 224-234. doi:10.1109/TWC.2003.819035
13. Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, vol. 34, iss. 3, pp. 276-280. doi:10.1109/TAP.1986.1143830
14. Liu X., Zhou B., Huang P., Xue W., Li Q., Zhu J., Qiu L. Kalman filter-based data fusion of Wi-Fi RTT, and PDR for indoor localization. *IEEE Sensors Journal*, 2021, vol. 21, iss. 6, pp. 1-12. doi:10.1109/JSEN.2021.3050456
15. Liang Q., Zhang G., Hsu L.-T. An empirical multi-wall NLOS ranging model for Wi-Fi RTT indoor positioning. *13th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Nuremberg, Germany, 2023, pp. 1-6. doi:10.1109/IPIN57070.2023.10332471
16. Geng J., Huang D., De la Torre F. DensePose from Wi-Fi. *arXiv.org*. 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.00250>
17. Halperin D. Ch., Hu W., Sheth A., Wetherall D. Tool release: Gathering 802.11n traces with channel state information. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2011, vol. 41, iss. 1. doi:10.1145/1925861.1925870
18. He W., Wu K., Zou Y., Ming Z. WiG: Wi-Fi-based gesture recognition system. *2015 24th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*, Las Vegas, NV, USA, 3-6 August, 2015, IEEE, 2015, pp. 1-7. doi:10.1109/ICCCN.2015.7288485
19. Love D. J., Heath Jr. R. W., Lau V. K. N., Gesbert D., Rao B. D., Andrews M. An overview of limited feed-

back in wireless communication systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, vol. 26, iss. 8, pp. 1341–1365. doi:10.1109/JSAC.2008.081002

20. Palipana S., Rojas D., Agrawal P., Pesch D. Fall-DeFi: Ubiquitous fall detection using commodity Wi-Fi devices. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 2018, vol. 1, no. 4, pp. 1–25. doi:10.1145/3161183

21. Horn B. K. P. Observation model for indoor positioning. *Sensors*, 2020, vol. 22, iss. 8. doi:10.3390/s20144027

22. Yang J., Chen X., Zou H., Wang D., Xu Q., Xie L. EfficientFi: Towards large-scale lightweight WiFi sensing via CSI compression. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, vol. 9, iss. 15, pp. 13086–13095. doi:10.1109/JIOT.2021.3139958

23. Qin Z., Fan J., Liu Y., Gao Y., Li G. Sparse representation for wireless communications: A compressive sensing approach. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2018, vol. 35, iss. 3, pp. 40–58. doi:10.1109/MSP.2018.2789521

UDC 621.372

doi:10.31799/1684-8853-2025-5-11-21

EDN: AVQGLM

Wi-Fi node location based on FTM technology

I. M. Protsenko^a, Assistant Professor, orcid.org/0009-0000-4761-1712

V. N. Malyshev^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0001-5011-0337, vm@ieee.org

^aSaint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», 5, Prof. Popov St., 197376, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The application of IEEE 802.11mc FTM technology for measuring distances and determining the location of network nodes is an active research area. The accuracy of distance estimation using FTM is limited by several factors related to signal propagation in real conditions and the hardware and software features of the nodes. **Purpose:** To develop and test practical positioning solutions for objects in buildings and structures based on FTM technology and to estimate the achievable accuracy of distance measurements. **Results:** With the experimental setup created, we have performed a series of measurements and estimated errors under various conditions. In addition, we have considered some methods for the compensation of the main error sources. The latter can be divided into two groups: multipath propagation, which leads to time scattering and a distortion of the round-trip time estimate; and hardware limitations, including the differences in clock frequency, timer drift, packet processing delays and timestamp quantization due to the discrete nature of timers. The frequency channel bandwidth affects the time resolution and does not allow achieving subnanosecond accuracy required to ensure distance estimation errors of the order of centimeters. One of the main conclusions made is that for the 2.4 GHz range the accuracy of distance determination is limited, with an error of up to 1 m. We furthermore consider the mathematical methods for processing the obtained data to reduce errors. **Practical relevance:** The presented implementation of hardware and software for measuring distances using IEEE 802.11mc technology has proven effective and can be used in indoor positioning systems.

Keywords — positioning, location, distance, Wi-Fi, FTM, RTT, time of flight, client, access point, Kalman filter.

For citation: Protsenko I. M., Malyshev V. N. Wi-Fi node location based on FTM technology. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2025, no. 5, pp. 11–21 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2025-5-11-21, EDN: AVQGLM

Financial support

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of a comprehensive project to create a high-tech production facility on the topic “Multimodal Airport Airspace Control Complex” (Agreement on the provision of a federal budget subsidy for the development of cooperation between a state scientific institution and an organization of the real sector of the economy in order to implement a comprehensive project to create a high-tech production facility No. 075-11-2025-023 of February 27, 2025) and within the framework of the RF Government Resolution No. 218 of April 9, 2010. The work was carried out at the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “St. Petersburg Electrotechnical University “LETI” named after V. I. Ulyanov (Lenin)”.

References

- Xu S., Wang Yu., Si M. A two-step fusion method of Wi-Fi FTM for indoor positioning. *Sensors*, 2022, vol. 22, iss. 9. doi:10.3390/s22093593
- Hashem O., Harras K. A., Youssef M. Accurate indoor positioning using IEEE 802.11mc round trip time. *Pervasive and Mobile Computing*, 2021, vol. 75, Article 101416. doi:10.1016/j.pmcj.2021.101416
- Vales V. B., Fernández O. C., Domínguez-Bolaño T., Escudero C. J., García-Naya J. A. Fine time measurement for the Internet of Things: A practical approach using ESP32. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, vol. 9, iss. 19, pp. 18305–18318. doi:10.1109/JIOT.2022.3158701
- Namee K., Srikanta N., Kaewkajone T., Thierchot T., Polpinij J., Kaewsangon R. Enhancing indoor positioning accuracy: A comprehensive study on euclidean distance, trilateration, Wi-Fi RTT and FTM. *CIIS 2023: 2023 the 6th International Conference on Computational Intelligence and Intelligent Systems*, Tokyo, November, 2023. doi:10.1145/3638209.3638235
- Xie Y., Li Z., Li M. Precise power delay profiling with commodity Wi-Fi. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2019, vol. 18, iss. 6, pp. 1342–1355. doi:10.1109/TMC.2018.2860991
- Schepers D., Singh M., Ranganathan A. Security analysis of WiFi fine timing measurement. *WiSec '21*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, June 28–July 2, 2021. doi:3448300.3467828
- Wang Z., Guo B., Yu Z., Zhou X. Wi-Fi CSI-based behavior recognition: From signals and actions to activities. *IEEE Communications Magazine*, 2018, vol. 56, iss. 5, pp. 109–115. doi:10.1109/MCOM.2018.1700144
- Aggarwal S., Sheshadri R. K., Sundaresan K., Koutsonikolas D. Is WiFi 802.11mc fine time measurement ready for prime-time localization. *ACM MobiCom '22: The 28th Annual International Conference on Mobile Computing and Net-*

- working, Sydney, NSW, Australia, October 17–21, 2022. doi:10.1145/3556564.3558234
9. Kokoreva E. V., Kostyukovich A. E. Results of positioning system field tests in the Wi-Fi network. *Ekonomika i kachestvo sistem svyazi*, 2021, no. 3. pp. 64–71 (In Russian). doi:10.7256/2454-0714.2024.4.72107
 10. Maltsev A. A., Maslennikov R. O., Khoryaev A. V. Influence of the phase noise on the OFDM data-transfer systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Radiofizika*, 2010, vol. 53, no. 8, pp. 528–529 (In Russian).
 11. Ibrahim M., Liu H., Jawahar A., Nguyen V., Gruteser M., Howard R., Yu B., Bai F. Verification: Accuracy evaluation of WiFi fine time measurements on an open platform. *MobiCom'18*, New Delhi, Oct 29–Nov 2, 2018. doi:10.1145/3241539.3241555
 12. Li X., Pahlavan K. Super-resolution TOA estimation with diversity for indoor geolocation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004, vol. 3, iss. 1, pp. 224–234. doi:10.1109/TWC.2003.819035
 13. Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, vol. 34, iss. 3, pp. 276–280. doi:10.1109/TAP.1986.1143830
 14. Liu X., Zhou B., Huang P., Xue W., Li Q., Zhu J., Qiu L. Kalman filter-based data fusion of Wi-Fi RTT, and PDR for indoor localization. *IEEE Sensors Journal*, 2021, vol. 21, iss. 6, pp. 1–12. doi:10.1109/JSEN.2021.3050456
 15. Liang Q., Zhang G., Hsu L.-T. An empirical multi-wall NLOS ranging model for Wi-Fi RTT indoor positioning. *13th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Nuremberg, Germany, 2023, pp. 1–6. doi:10.1109/IPIN57070.2023.10332471
 16. Geng J., Huang D., De la Torre F. DensePose from WiFi. *arXiv.org*. 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.00250>
 17. Halperin D. Ch., Hu W., Sheth A., Wetherall D. Tool release: Gathering 802.11n traces with channel state information. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2011, vol. 41, iss. 1. doi:10.1145/1925861.1925870
 18. He W., Wu K., Zou Y., Ming Z. WiG: WiFi-based gesture recognition system. *2015 24th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*, Las Vegas, NV, USA, 3–6 August, 2015, IEEE, 2015, pp. 1–7. doi:10.1109/ICCCN.2015.7288485
 19. Love D. J., Heath Jr. R. W., Lau V. K. N., Gesbert D., Rao B. D., Andrews M. An overview of limited feedback in wireless communication systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, vol. 26, iss. 8, pp. 1341–1365. doi:10.1109/JSAC.2008.081002
 20. Palipana S., Rojas D., Agrawal P., Pesch D. FallDeFi: Ubiquitous fall detection using commodity Wi-Fi devices. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 2018, vol. 1, no. 4, pp. 1–25. doi:10.1145/3161183
 21. Horn B. K. P. Observation model for indoor positioning. *Sensors*, 2020, vol. 22, iss. 8. doi:10.3390/s20144027
 22. Yang J., Chen X., Zou H., Wang D., Xu Q., Xie L. EfficientFi: Towards large-scale lightweight WiFi sensing via CSI compression. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, vol. 9, iss. 15, pp. 13086–13095. doi:10.1109/JIOT.2021.3139958
 23. Qin Z., Fan J., Liu Y., Gao Y., Li G. Sparse representation for wireless communications: A compressive sensing approach. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2018, vol. 35, iss. 3, pp. 40–58. doi:10.1109/MSP.2018.2789521

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая Scopus и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, что снижает рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста, есть возможность провести регистрацию на 12 языках, включая русский (чтобы выбрать язык, кликните на зеленое поле сверху справа на стартовой странице): <https://orcid.org>