DOI: 10.24892/RIJIE/20250402

Позиционирование IoT устройств с использованием технологии измерения времени пробега сигнала в стандартах 802.11*

Чижов А.С.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
artem4ik500@yandex.ru

Аннотация. **В статье исследован метод позиционирования объектов Интернета вещей на основе измерения времени пробега сигнала в стандартах 802.11. Проанализированы теорети-ческие материалы по теме локального позиционирования устройств Интернета вещей. Проведён эксперимент по оценке дальности между устройствами. В эксперименте использовались платы ESP32 с поддержкой протокола точ-ного измерения времени FTM. Применен базовый алгоритм фильтра Калмана для уточнения полученных оценок.**

Ключевые слова: **Интернет вещей, FTM, RTT, фильтр Калмана.**

Введение

Позиционирование объектов Интернета вещей (IoT) внутри помещений является функцией, которая обеспечивает точное определение местоположения устройств или людей в пространстве. Это имеет ключевое значение для ряда приложений, таких как:

• Умный дом: управление устройствами и автоматизация систем на основе их местоположения;

• Здравоохранение: локализация пациентов и отслеживание их перемещений;

• Производство: контроль и мониторинг оборудования и процессов в реальном времени.

В отличие от пространства вне зданий, где с помощью GPS можно определить местоположение устройства с точностью до нескольких метров, для локализации мобильных объектов требуется более точное позиционирование. Среди существующих методов локального позиционирования, таких как Bluetooth, Radio Frequency Identification (RFID), ZigBee, способы позиционирования, использующие WI-FI-инфраструктуру, являются наиболее актуальными в связи с широким использованием технологии WI-FI в помещениях.

В группу стандартов IEEE 802.11 включены дополнения, которые описывают протокол FTM (Fine Timing Management) для определения местоположения на основе точного измерения времени. Протокол FTM предоставляет способ оценки времени прохождения сигнала Round Trip Time (RTT) между передатчиком и приемником без применения тактовой синхронизации. Данный протокол был поддержан производителями ряда чипсетов и реализован в операционной системе Android (с 9.0), в которой были так же предоставлены интерфейсы для разработчиков приложений.

Целью данной работы является исследование технологии точного измерения времени пробега сигнала в стандартах 802.1 на основе протокола FTM, а также способы снижения ошибок оценки дальности.

В соответствии с этой целью были поставлены следующие задачи:

1) изучить технологию измерения пробега времени сигнала в стандартах 802.11:

2) подобрать оборудование и провести эксперимент по оценке дальности между устройствами, поддерживающими данную технологию;

3) провести математическую обработку полученных оценок дальности.

Протокол FTM

IEEE 802.11 – это постоянно развивающийся набор стандартов, направленный на повышение производительности сети Wi-Fi. Одним из последних нововведений в стандарт IEEE 802.11mc является протокол Wi-Fi Fine Timing Measurement (FTM).

Протокол Wi-Fi FTM называется Wi-Fi Location и обычно упоминается как Wi-Fi Round Trip Time (RTT). Протокол измерения позволяет станциям оценивать расстояние между ними с точностью до метра. С момента утверждения в 2019 году Wi-Fi FTM все чаще используется для создания новых сервисов, основанных на определении местоположения. Например, Google представила поддержку Wi-Fi FTM (названного Google Wi-Fi Round-Trip Time) в Android 9.0 и расширила его функциональность в Android 12 [1]. С тех пор Google выпустила два приложения для Android (WiFi RTTScan и WiFiRTTLocator), позволяющие пользователям реализовывать проекты по определению местоположения внутри помещений.

Протокол Wi-Fi FTM обеспечивает двусторонний обмен данными между инициатором и ответчиком. Инициатором обычно является смартфон, а ответчиком – точка доступа Wi-Fi, оба должны поддерживать протокол FTM. Принцип определения расстояния согласно протоколу FTM показан на рис. 1.

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-практической конференции Индустрия 4.0", https://smartindustrycon.ru

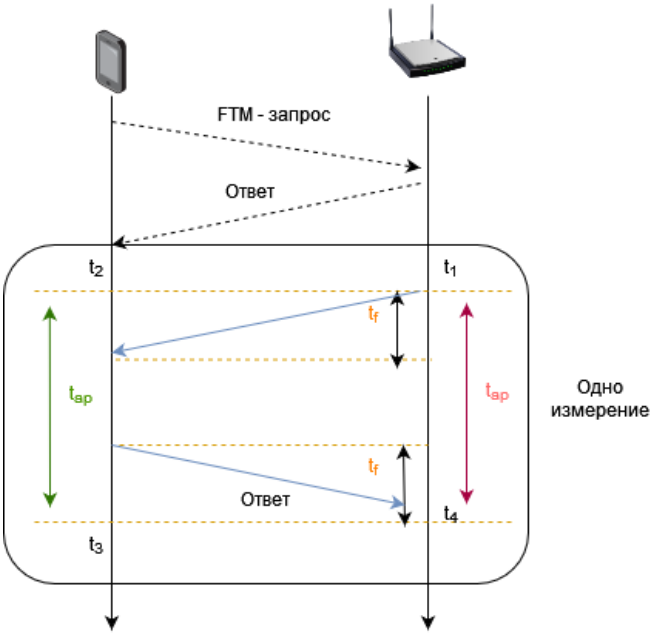


Рис. 1. Схема получения оценки дальности на основе протокола FTM

Весь процесс начинается с того, что смартфон (SP) отправляет запрос FTM к точке доступа (AP) и ожидает пакет подтверждения от неё. Далее измерение расстояния происходит следующим образом: точка доступа отправляет кадр FTM на смартфон и фиксирует время отправления t_1. Смартфон получает этот кадр и записывает время его прибытия t_2. Затем, после обработки кадра и записи времени отправления t_3, он отправляет ответный запрос обратно к точке доступа. Точка доступа получает данную информацию и записывает время прибытия t_4. Во время следующего измерения значение времени t_4 передаётся на смартфон.

Время обмена данными между двумя устройствами обозначается как t_f, и может быть найдено как:

$$t_f = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2} = \frac{t_{ap} - t_{sp}}{2},$$

где t_{sp} и t_{ap} представляют временную задержку при измерении дальности для смартфона и точки доступа соответственно.

Расстояние между смартфоном и точкой доступа оценивается с помощью уравнения

$$d = t_f \cdot c,$$

где c – скорость света.

Было установлено, что некоторые конфигурации системы, в частности, при рабочей частоте 2,4 ГГц с полосой пропускания 20-40 МГц в точке доступа, часто дают неверные оценки и без калибровки могут привести к неверным оценкам дальности, в том случае, когда истинное расстояние составляет менее 6 метров. Эта ошибка возникает даже тогда, когда составляющая сигнала LoS (Line OfSight - прямая видимость) преобладает над составляющими сигнала NLoS (Non-LineOfSight – вне прямой видимости). Из-за NLos возникает явление многолучевости, когда в точке приема радиосигнала присутствует не только прямой луч, но также отраженный и преломленный лучи.

На частоте 5 ГГц и полосе пропускания 80 МГц результаты оценки расстояния приближаются к метровой точности в условиях использования LoS внутри помещений, но становятся ненадежными на расстояниях более 20 метров в условиях NLoS. Использование внешних антенн с различной ориентацией может помочь устранить эту проблему. Кроме того, использование более длинных кабелей для подключения антенн может снизить ошибку измерений. Длинные кабели позволяют разместить антенны на оптимальном расстоянии от корпуса оборудования и источников электромагнитных помех, что снижает уровень искажений в принимаемом сигнале. Кроме того, правильный подбор и экранирование кабелей помогают минимизировать потери сигнала и улучшить согласование импеданса между антенной и приемопередатчиком. В сочетании с фильтрацией помех это приводит к более стабильным и точным измерениям расстояния. После выполнения вышеописанных рекомендаций расчетные расстояния будут в пределах ±1 метра отличаться от фактического расстояния даже в сложных радиочастотных условиях.

Подводя итог, можно сказать, что Wi-Fi FTM – это первый шаг к интеграции информации о местоположении устройств в стандарты IEEE 802.11, они так же используются в качестве основы для стандартов следующего поколения, таких как IEEE 802.11az (WiFi Next Generation Positioning) и Wi-Fi Aware [2].

Информация о состоянии канала

В беспроводной системе связи информация о состоянии канала (CSI – ChannelStateInformation) позволяет оценить свойства канала связи. Эта информация описывает то, как сигнал распространяется от передатчика к приемнику, и представляет собой комбинированные данные, например, о рассеянии, замирании или о снижения мощности сигнала в зависимости от расстояния. CSI позволяет адаптировать параметры сигнала к текущим условиям канала, что имеет решающее значение для обеспечения надежной связи с высокими скоростями передачи данных.

CSI должна оцениваться на приемнике и отправляться обратно на передатчик. Следовательно, передатчик и приемник могут иметь разный CSI. CSI на передатчике и приемнике иногда называются CSIT и CSIR соответственно.

Существуют два вида CSI, а именно мгновенная и статистическая. Мгновенная CSI (или кратковременная CSI) оперирует с заданными условиями канала. Её можно рассматривать как импульсную характеристику цифрового фильтра. Мгновенная CSI даёт возможность адаптировать передаваемый сигнал к импульсной характеристике и тем самым оптимизировать принимаемый сигнал для пространственного мультиплексирования или достижения низкой частоты битовых ошибок.

Обработка статистической (долгосрочной) CSI основана на статистической характеристике канала. Это описание может включать, например, закон распределения затухания, среднее усиление канала, условие прямой видимости и пространственную корреляцию.

Как и в случае с мгновенной CSI, эта информация может быть использована для оптимизации передачи.

Получение CSI практически ограничено быстро меняющимися условиями канала. В системах с быстрым замиранием при передаче одного информационного символа, целесообразно использовать только статистическую CSI. С другой стороны, в системах с медленными замираниями мгновенная CSI может быть оценена с заданной точностью и в дальнейшем использоваться для адаптации передачи данных в течение некоторого времени.

В практических системах обычно используется два вида CSI. Мгновенная CSI с некоторой ошибкой оценки объединяется со статистической информацией.

Экспериментальное исследование оценки расстояния на основе FTM

На сегодняшний день одним из доступных решений для оценки дальности измерений с использованием технологий FTM является устройство ESP32.

ESP32 – это преемник ESP8266, разработанный компанией Espressif Systems. Данный чипсет обладает низким энергопотреблением, и поддерживает Wi-Fi и двухрежимное Bluetooth-соединения (Espressif, 2020). Новые устройства ESP32 C и S от Espressif поддерживают технологию WiFi FTM. Компания Espressif специализируется на создании программного инструмента для изучения дистанционного измерения времени и расстояния между устройствами Wi-Fi с использованием матрицы состояния каналов связи (CSI) через стек протоколов TCP/IP [3].

Перед началом проведения измерений платы ESP32 были запрограммированы с использованием специального программного обеспечения.

В эксперименте использовалось две платы для оценок дальностей FTM. Одна из плат в паре была запрограммирован в качестве точки доступа, другая – как мобильная станция.

Все измерения производились с шириной частотного канала 40МГц на частоте 2,4 ГГц.

У плат ESP32 определены характеристики HT40 (HighThroughput) и HT20, (HighThroughput) указывающие на полосу пропускания 40МГц и 20МГц соответственно

В режиме точки доступа фактическая пропускная способность согласуется между мобильной станцией и точкой доступа во время установления Wi-Fi соединения. Она будет HT40 только в случае, если и точка доступа, и подключенная станция поддерживают HT40; в противном случае, она будет установлена по умолчанию на HT20. Если пропускная способность подключенной точки доступа изменяется, фактическая пропускная способность согласуется заново без отключения Wi-Fi.

Аналогично, в режиме мобильной станции фактическая полоса пропускания согласуется между точкой доступа и станцией. Она будет HT40, если и точка доступа, и станция поддерживают HT40; в противном случае, она будет HT20.

В режиме сопряжения точка доступа и станция могут настраивать HT20/40 отдельно. Если обе стороны согласованы на HT40, канал HT40 должен быть каналом станции, так как станция всегда имеет более высокий приоритет, чем точка доступа в ESP32.

Режим HT40 может увеличить пропускную способность, так как максимальная скорость необработанных физических данных (PHY) для HT40 составляет 150 Мбит/с, тогда как для HT20 — 72 Мбит/с. Однако, в условиях плотного Wi-Fi окружения, когда рядом с ESP32 находится множество других устройств, производительность HT40 может снизиться. Поэтому, для обеспечения стабильной работы приложений в таких условиях, рекомендуется всегда устанавливать полосу пропускания на HT20.

Платы ESP32 осуществляют многократное определение расстояния в течение заданного интервала времени. В результате формируется набор временных отсчётов, каждому из которых соответствует значение расстояния, рассчитанное с использованием FTM. Полученные данные позволяют проводить дальнейший анализ.

Перед началом проведения эксперимента с помощью спектроанализатора была экспериментально определена полоса пропускания частотного канала (рис. 2) она составила 40 мГц.

Рис. 2 Полоса пропускания частотного канала ESP-32

Антенна спектроанализатора была помещена между исследуемыми устройствами.

Первый эксперимент по оценки дальности проводился в одном из помещений (коридор, рис. 3). Эксперимент проводился для двух различных положений исследуемых точек. В первом положении расстояние между точками было - 10.7 м. Эксперимент с данным расположением точек проводился дважды. Далее расстояние между точками уменьшили до 7.5 м. Расстояние от столов до боковых стен не изменялось и было равным 1.25 м.

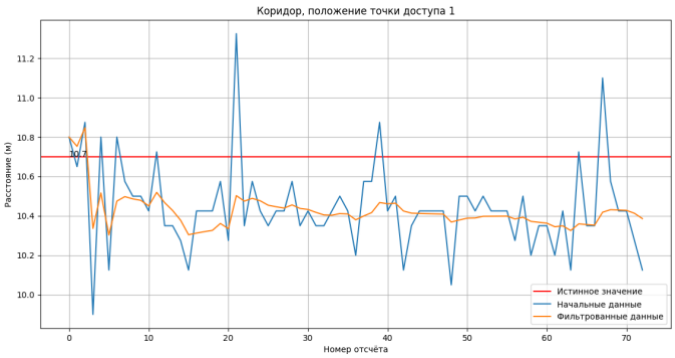
Показания уровня принимаемого сигнала (RSSI) регистрировались с помощью персонального компьютера, подключенного к приёмнику ESP-32. Так же на этом компьютере был запущен скрипт для получения оценок дальности по протоколу FTM.

В качестве точки доступа был использован маршрутизатор от компании ASUS, поддерживающий протокол FTM. Конфигурация устройств осталась прежняя: частота - 2.4 ГГц полоса – 40 МГц.

Второй эксперимент проводился в аудитории. Расстояние между точками для первой, второй и третьей попытки были 5.5 м, 9.7 м и 2.4 м соответственно. Ширина помещения – 7 м. В данном помещении между исследуемыми-точками не было прямой видимости, что привело к многолучевому распространению сигнала.

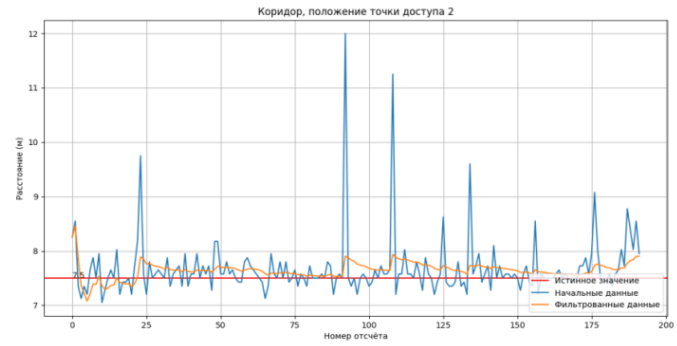
Результаты измерений, объединенные с результатами последующей математической обработкой представлены на рис. 4 и 5.

Рис. 3. Условия эксперимента



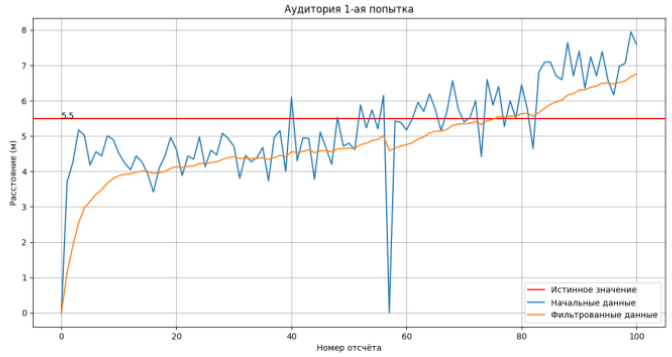
а

б

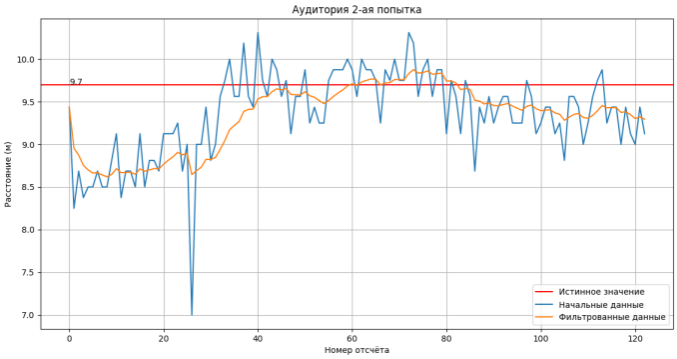


в

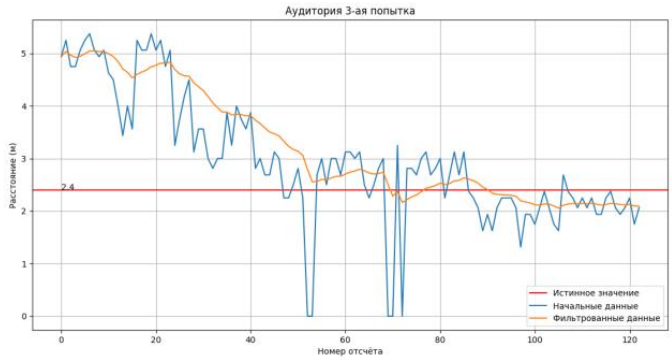
Рис. 4. Зависимости оценки расстояния между точками от количества отсчётов (эксперимент в коридоре)



а



б



в

Рис. 5. Зависимости оценки расстояния между точками от количества отсчётов (эксперимент в аудитории)

Математическая обработка результатов

Для повышения точности оценок дальности необходимо провести математическую обработку полученных оценок дальности. Для решения этой задачи был использован алгоритм на основе фильтра Калмана.

Фильтр Калмана – это рекурсивный алгоритм, предназначенный для оценки состояния динамической системы на основе неполных и зашумленных данных.

Общая формула фильтра Калмана для дискретного времени выглядит следующим образом:

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

где P_k – ошибка оценивания, зависящая от дисперсии σ_k^2, z_k наблюдение в k-ый момент времени, $\hat{x}_k$ – оценка местоположения в k-ый момент времени.

$$P_k = \frac{P_{k-1} \cdot \sigma_k^2}{P_{k-1} + \sigma_k^2}.$$

Входные параметры Фильтра:
- начальное состояние x_0 равно первому измерению;
- дисперсия $\sigma_k^2 = 0.1$ м.

Начальные параметры оставались неизменными.

Реализация фильтра Калмана была осуществлена на основе работ [4-6]. Графики зависимостей оценок дальности от отсчётов их измерения представлены выше (см. рис 4-5).

Графики на рис. 4, *а-в* демонстрируют зависимости оценки расстояния между исследуемыми точками от количества отсчётов, полученных в коридоре. Графики на рис. 5, *а-в* демонстрируют зависимости оценки расстояния между точками от количества временных отсчётов, полученных в аудитории.

На графиках синей линией обозначаются оценки дальности без применения фильтра Каламана, оранжевая линия отражает результат применения фильтра, красная линия – истинное расстояние.

В результате проведения математической обработки было установлено, что фильтр Калмана позволяет уточнить полученные оценки дальности. Значения средней ошибки при оценивании дальности следующие:

Средняя ошибка в аудитории до применения фильтра Калмана – 0.46 м, после применения – 0.4 м.

Средняя ошибка в коридоре до применения фильтра Калмана – 0.35 м, после применения – 0.21 м.

Заключение

Применение FTM актуально для навигации внутри помещений, улучшения точности определения местоположения и создания новых сервисов, таких как точное позиционирование.

В рамках эксперимента была получена оценка дальности с использованием FTM. Эти данные были собраны в двух различных локациях: в аудитории и коридоре, что позволило оценить работу системы в различных условиях окружающей среды.

Исходя из полученных графиков можно сделать вывод, что фильтр Калмана позволяет уточнить полученные оценки.

Дальнейшее исследование и применение математических методов обработки данных позволит улучшить точность и надежность системы позиционирования IoT устройств. В условиях многолучевости достаточно проблематично оценить расстояние. Для работы системы в условиях многолучвости необходимо использовать более глубокий анализ принятых сигналов: основного и отраженных. В качестве одного из решений можно предложить использование нескольких приемников с последующей реализацией алгоритма MUSIC (Multiple Signal Classification).

Литература

1. Xu S. A Two-Step Fusion Method of Wi-Fi FTM for Indoor Positioning / S. Xu, Y. Wang, M. Si // Sensors. – 2022. – 22(9). – 3593. DOI: 10.3390/s22093593.

2. Zhang W. A novel WiFi indoor positioning strategy based on weighted squared Euclidean distance and local principal gradient direction / W. Zhang, X. Hua, K. Yu, W. Qiu, S. Zhang, X. He // Sens. Rev. – 2019. – 39. – P. 99-106.

3. https://web.archive.org/web/20180725122527/https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. (дата обращения 20.12.2024).

4. http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/media/pdf/Kalman1960.pdf. (дата обращения 20.12.2024).

5. Zhang D. Real-Time Locating Systems Using Active RFID for Internet of Things / D. Zhang, L.T. Yang, M. Chen, S. Zhao, M. Guo, Y. Zhang // IEEE Syst. J. – 2019.

6. Comparison of Parameters. – URL: https://www.espressif.com/en/products/modules/esp32 (дата обращения 20.12.2024).

DOI: 10.24892/RIJIE/20250402

Positioning of IoT Devices Using theTime-of-Flight Measurement Technology of 802.11 Standards

Chizhov A.S.
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
Saint Petersburg, Russian Federation
artem4ik500@yandex.ru

Abstract. **The article examines the method of positioning Internet of Things objects based on measuring the travel time of a signal in 802.11 standards. Theoretical materials on the topic of local positioning of Internet of Things devices are analyzed. An experiment was conducted to estimate the range between devices. The experiment used ESP 32 cards with support for the TM time precision protocol. The basic Kalman filter algorithm is applied to refine the estimates obtained.**

Keywords: **: Internet of Things, FTM, RTT, Kalman filter.**

Библиографическое описание статьи

Чижов А.С. Позиционирование IoT устройств с использованием технологии измерения времени пробега сигнала в стандартах 802.11 // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2025. – Т.12, №4. – С. 10-14. DOI: 10.24892/RIJIE/20250402

Reference to article

Chizhov A.S. Positioning of IoT devices using the time-of-flight measurement technology of 802.11 standards, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2025, vol.12, no.4, pp. 10-14. DOI: 10.24892/RIJIE/20250402
