

# Экспериментальное исследование средств позиционирования в сетях Wi-Fi

Е. С. Багаев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

bagaeve13@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается возможность применения микроконтроллеров семейства ESP32 в качестве основы системы позиционирования в беспроводных локальных сетях Wi-Fi. Описана архитектура построения сети для сбора первичных дальномерных измерений на базе механизма Fine Time Measurement. На основе ESP32 реализованы точки доступа и метка, выполняющие обмен FTM-сообщениями и измерение времени распространения сигнала. Сделан вывод о возможности применения ESP32 для создания систем позиционирования в помещении.

**Ключевые слова:** беспроводная локальная сеть, Wi-Fi, позиционирование, ESP32

## I. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время системы позиционирования в помещении на основе беспроводных локальных сетей (БЛС) Wi-Fi (*Wireless-Fidelity*) привлекают все большее внимание. Интерес к таким системам вызван невозможностью точного определения местоположения (ОМП) в закрытых пространствах с помощью традиционных методов, основанных на системе глобальной спутниковой навигации GPS (*Global Positioning System*) [1], [2], [3]. Системы GPS хорошо работают на открытом пространстве, когда сигнал не подвержен ослаблению при прохождении сквозь препятствия. Работа таких систем в условиях закрытых пространств не способна обеспечить требуемую точность ОМП. Это ограничение приводит к возрастающему интересу поиска новых технологий позиционирования и методов их реализации. Среди всех имеющихся способов организации системы позиционирования выделяются технологии, применяемые в БЛС Wi-Fi [4]. К преимуществам систем Wi-Fi можно отнести невысокую стоимость, простоту в организации новых сетей и возможность использования уже имеющейся беспроводной инфраструктуры в задачах ОМП [5]. К наиболее распространенным решениям задачи ОМП в БЛС Wi-Fi можно отнести алгоритмы, основанные на уровне принимаемого сигнала RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) [6], [7] и алгоритмы точного измерения времени FTM (*Fine Time Measurement*) [8], [9]. Рассмотрим принцип их действия и возможность реализации на микроконтроллерах ESP32.

## II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ УСТРОЙСТВА С ПОМОЩЬЮ ТРИЛАТЕРАЦИИ

Трилатерация является методом определения координат ПУ относительно множественных ТД. Основой этого метода является измерение расстояния между ПУ и ТД [10]. Для реализации трилатерации на плоскости необходимо минимум 3 ТД. Одним из допущений при трилатерации является то, что

координаты ТД известны заранее. На рис. 1 представлена общая схема расположения ТД и ПУ при трилатерации.

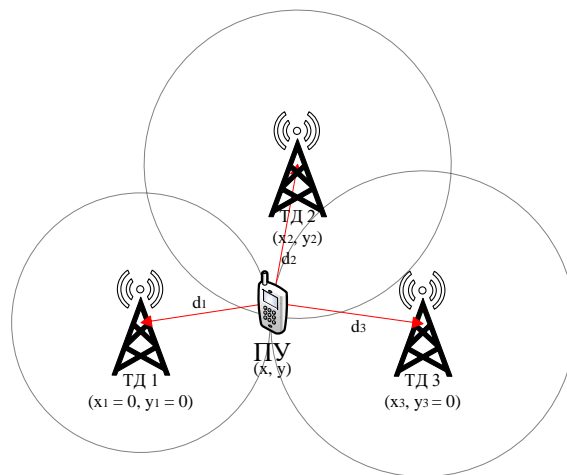


Рис. 1. Расположение ТД и ПУ для трилатерации

В БЛС, изображенной на рис. 1 координаты ТД1 являются начальной точкой отсчета для определения координат остальных ТД и ПУ. ТД2 расположена выше остальных ТД и имеет координаты  $(x_2, y_2)$ . ТД3 имеет координаты  $(x_3, y_3 = 0)$  и расположена вдоль горизонтальной оси относительно ТД1. Координаты ПУ  $(x, y)$  неизвестны. Расстояние между ПУ и ТД1, ТД2, ТД3 обозначены как  $d_1, d_2, d_3$ . Зная координаты ТД и расстояние между ними и ПУ, можно определить координаты  $(x, y)$  ПУ, используя общее уравнение окружности:

$$\begin{aligned}d_1^2 &= x^2 + y^2 \\d_2^2 &= (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \\d_3^2 &= (x - x_3)^2 + y^2\end{aligned}\quad (1)$$

В этих уравнениях присутствуют неизвестные  $x$  и  $y$ , которые соответствуют расчетному местоположению ПУ и должны удовлетворять всем трем уравнениям. Применяя простые методы исключения переменных, можно найти  $x$  и  $y$ :

$$\begin{aligned}x &= (d_1^2 - d_2^2 + x_3^2) / (2 \cdot x_3) \\y &= ((d_1^2 - d_2^2 + x_2 + y_2) / 2 \cdot y_2) - (x \cdot x_2) / y_2\end{aligned}$$

Таким образом, с помощью решения системы уравнений (1) можно найти искомые координаты ПУ. Главным фактором, определяющим точность процедуры ОМП ПУ при трилатерации выступает точность первичной оценки  $d$  между ТД и ПУ. Рассмотрим существующие методы определения  $d$  в БЛС Wi-Fi.

### III. МЕТОД ОЦЕНКИ РАССТОЯНИЯ ПО *RSSI*

Использование значений *RSSI* в задачах ОМП является одним из наиболее популярных решений для оценки местоположения ПУ относительно ТД [11]. Особенностью такого способа является возможность вычислить  $d$  с помощью *RSSI*. Поскольку при распространении сигнала радиоволны испытывают затухание, то  $d$  может быть определено как соотношение мощностей передаваемого и принимаемого сигналов. Объединение информации о *RSSI* с моделью распространения сигнала, соответствующей сценарию использования БЛС, помогает добиться более точного определения  $d$ . В общем случае  $d$  определяется как [12]:

$$d = d_0 \cdot 10^{((P_0 - RSSI)/10 \cdot n)} \quad (2)$$

где  $d_0$  – эталонное расстояние, обычно 1 м;  $P_0$  – уровень сигнала на расстоянии  $d_0$ ; *RSSI* – уровень принимаемого сигнала на расстоянии  $d$ ;  $n$  – показатель степени затухания, зависит от модели потерь при распространении сигнала.

Модель потерь, применяемая при расчете  $d$  выбирается для конкретных условий функционирования БЛС. Ее главным фактором является способность достоверно отражать *RSSI* при заданных параметрах окружающей среды. Поскольку значения *RSSI* подвержены изменениям вследствие возникающих помех в зоне работы БЛС, используемая модель потерь должна частично компенсировать возникающие отклонения при измерении *RSSI* за счет предварительной калибровки. Однако, из-за того, что точный уровень сигнала, излучаемого ТД не всегда известен, уравнение (2) не всегда может быть использовано в задачах высокоточного позиционирования. В таком случае требуются альтернативные подходы к оценке  $d$ .

### IV. МЕТОД ОЦЕНКИ РАССТОЯНИЯ ПО *RTT*

Помимо *RSSI*, для измерения расстояния  $d$  между ТД и ПУ в БЛС *Wi-Fi* может применяться метод, основанный на времени распространения сигнала между устройствами. Для этого в стандарте *IEEE 802.11mc* был определен протокол точного измерения времени *FTM* (*Fine Time Measurement*), который позволяет измерить расстояние между двумя устройствами [13]. Протокол включает в себя несколько сообщений, последовательно отправляемых как ПУ, так и ТД. На рисунке 2 представлена схема обмена сообщениями между устройствами при реализации *FTM*. На первом этапе ПУ отправляет ТД запрос на установление *FTM*-сессии. В ответ, ТД высылает *FTM*-сообщение на ПУ. Каждая отправка сообщений от ПУ и ТД сопровождается подтверждением со стороны принимающего устройства. После подтверждения получения *FTM*-сообщения со стороны ПУ, ТД отправляет на ПУ результаты измерения *FTM*. Круговая задержка *RTT* (*Round Trip Time*) распространения сигнала между ПУ и ТД может быть определена как:

$$RTT = ((t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)) \quad (3)$$

где  $c$  – скорость света, м/с;

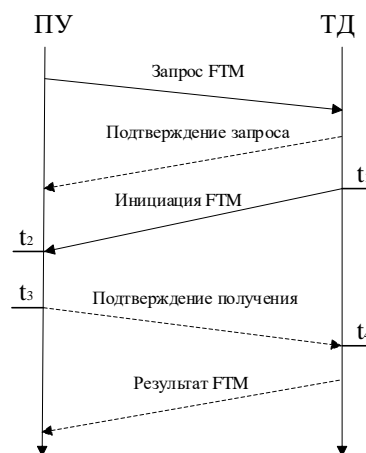


Рис. 2. Процесс обмена сообщениями при *FTM*

На основе значений *RTT* возможно найти  $d$ :

$$d = (RTT \cdot c) / 2 \quad (4)$$

При оценке  $d$  по *RTT* на точность измерений будет влиять наличие или отсутствие прямой видимости *LoS* (*Line-of-Sight*). В работе [14] показано, что наличие препятствий между ТД и ПУ способно привести к завышению значений  $d$  из-за увеличения расстояния прохождения сигнала, причем величина отклонения зависит от материалов препятствий. Помимо физических условий среды распространения, точность оценки  $d$  может быть снижена из-за задержки обработки и реализации *FTM*-сообщений на самих ТД и ПУ. Основными источниками ошибок в таком случае является нестабильность тактовых генераторов, а также фиксированные и переменные задержки в радиочастотном тракте. В результате, даже при наличии *LoS*, разные модели устройств будут демонстрировать неодинаковую точность измерений  $d$ , что требует дополнительной калибровки на этапе измерений или постобработки результатов.

### V. ОЦЕНКА РАССТОЯНИЯ С ПОМОЩЬЮ ESP32

Исследование средств и методов позиционирования в БЛС *Wi-Fi* может быть реализовано как с помощью коммерческих устройств (*Wi-Fi* роутеры, смартфоны, ноутбуки), так и с помощью аппаратных платформ с готовой архитектурой. Разница между этими типами устройств заключается в том, что коммерческие решения изначально не предназначены для экспериментов. В свою очередь, аппаратные платформы позволяют гибко настраивать параметры функционирования БЛС. Также, немаловажной характеристикой открытых платформ является их малая стоимость по сравнению с коммерческими устройствами. Следовательно, для проведения исследований зачастую выбор делается в пользу второй категории устройств.

Проведем экспериментальное исследование возможности сбора первичных измерений для оценки  $d$ . В качестве аппаратной платформы были выбраны микроконтроллеры серии *ESP32*. Преимуществом применения этих устройств в задачах ОМП является поддержка сбора информации о состоянии канала *CSI* (*Channel State Information*). В отличие от *RSSI*, который представляет собой усредненную мощность сигнала по всей полосе частот, *CSI* предоставляет информацию об

амплитуде и фазе каждой поднесущей. Такой подход позволяет разделить компоненты сигнала на *LoS* и *NLoS* (*Non-Line-of-Sight*) составляющие. Использование *LoS* компоненты при расчете *RSSI* позволяет снизить ошибки при расчете *d*.

Микроконтроллеры семейства *ESP32* также поддерживают протокол *FTM*. Поддержка *FTM* реализована в чипах *ESP32-S2*, *ESP32-C3*, *ESP32-C6* и *ESP32-S3*. Для этого, перед началом экспериментов, устройство должно быть запрограммировано соответствующим образом. Процесс прошивки и отладки программной части производится с помощью официального фреймворка *ESP-IDF* (*Espressif IoT Development Framework*) [15].

На первом этапе устройство подключается к персональному компьютеру (ПК). Далее, с помощью команд, представленных в таблице 1, проводится предварительная настройка, компиляция и прошивка проекта.

ТАБЛИЦА 1.

Команда	Описание
<code>idf.py set-target</code>	Выбор устройства, подключаемого к ПК. Выполняется один раз при подключении устройства
<code>idf.py menuconfig</code>	Вывод текстового меню настроек проекта
<code>idf.py build</code>	Сборка, компиляция проекта. В случае изменения настроек проекта с помощью команды <code>idf.py menuconfig</code> или изменения исходных файлов, требуется повторный ввод команды
<code>idf.py -p PORT flash monitor</code>	Выбор последовательного порта, по которому устройство подсоединено к ПК; загрузка проекта во внутреннюю память устройства; обмен данными с устройством с помощью последовательного интерфейса и вывод результатов на экран ПК

По готовности необходимо перейти к настройке устройства. Микроконтроллеры *ESP32* могут выступать как в роли ПУ, так и ТД. Для этого устройство конфигурируется в соответствии с выбранной задачей с помощью команд, встроенных в библиотеку *ESP-IDF* *ftm*.

Приведем пример работы устройства *ESP32-S3* при сборе первичных измерений *RSSI* и *RTT*. Для этих целей 2 устройства *ESP32-S3* были прошиты как ПУ и ТД. Оба устройства работают в диапазоне 2,4 ГГц на 6 канале, ширина канала 20 МГц. После включения ПУ производит поиск доступных ТД. Среди всех устройств отдельно выделяются устройства с поддержкой протокола *FTM*, рис. 3.

```
ftm_station: sta start to scan
ftm_station: [Bonch Lite][rssi=-46]
ftm_station: [GUTNet][rssi=-49]
ftm_station: [Bonch][rssi=-50]
ftm_station: [TEST][rssi=-53][FTM Responder]
ftm_station: [Bonch][rssi=-64]
ftm_station: [GUTNet][rssi=-65]
ftm_station: [Bonch Lite][rssi=-73]
ftm_station: [524 пользователя A][rssi=-75]
```

Рис. 3. Результат сканирования. ТД с поддержкой *FTM* имеют отметку «*FTM Responder*»

После того, как соединение с ТД будет установлено, ПУ инициирует *FTM* сессию и обмен сообщениями, в соответствии с рисунком 2. Результат обмена сообщениями приведен на рисунке 4, ТД и ПУ при этом находились на расстоянии  $d = 1$  м.

```
session ends with 29 valid readings out of 29 readings received, Avg raw RTT: 7.4 nsec, Avg RSSI: -15
FTM report from 2c:0f:02:da:46:f9 with 29 entries
RTT: 7, RSSI: 7, DIST: 106
[0] RTT: 9376, RSSI: -21, T1: 3278082867, T2: 57895, T3: 3394145399, T4: 83943
[1] RTT: 9376, RSSI: -21, T1: 1075001179, T2: 57990, T3: 226240971, T4: 83946
[2] RTT: 9376, RSSI: -22, T1: 3855001179, T2: 57988, T3: 504240971, T4: 83946
[3] RTT: 9376, RSSI: -21, T1: 2669500179, T2: 57990, T3: 2788251234, T4: 83946
[4] RTT: 7813, RSSI: -17, T1: 3948939155, T2: 57142, T3: 4067799585, T4: 83990
[5] RTT: 6251, RSSI: -16, T1: 1276266195, T2: 57152, T3: 1394148509, T4: 84090
[6] RTT: 6251, RSSI: -15, T1: 1532266195, T2: 57152, T3: 1632148509, T4: 84090
[7] RTT: 7813, RSSI: -15, T1: 1742266195, T2: 57152, T3: 1861150962, T4: 84090
[8] RTT: 6250, RSSI: -15, T1: 2481786171, T2: 57196, T3: 2680699813, T4: 84044
[9] RTT: 6250, RSSI: -15, T1: 2763737875, T2: 57197, T3: 2882734242, T4: 84044
[10] RTT: 6251, RSSI: -15, T1: 2123779579, T2: 57198, T3: 2342768559, T4: 84046
[11] RTT: 6251, RSSI: -15, T1: 2530683203, T2: 57199, T3: 2655801330, T4: 84047
[12] RTT: 7813, RSSI: -15, T1: 811986835, T2: 57237, T3: 1090192022, T4: 84085
[13] RTT: 6251, RSSI: -15, T1: 713078739, T2: 57238, T3: 832176669, T4: 84086
[14] RTT: 6251, RSSI: -15, T1: 2515111443, T2: 57239, T3: 2634212490, T4: 84087
[15] RTT: 6251, RSSI: -14, T1: 384550419, T2: 57283, T3: 503760849, T4: 84131
[16] RTT: 6251, RSSI: -15, T1: 1988583123, T2: 57284, T3: 2167796676, T4: 84132
[17] RTT: 6250, RSSI: -15, T1: 16615207, T2: 57285, T3: 13583994, T4: 84133
[18] RTT: 7813, RSSI: -14, T1: 410761827, T2: 57286, T3: 822834089, T4: 84133
[19] RTT: 6251, RSSI: -15, T1: 3969654803, T2: 57329, T3: 4079335983, T4: 84177
[20] RTT: 7813, RSSI: -15, T1: 4046887587, T2: 57330, T3: 4165419812, T4: 84178
[21] RTT: 6251, RSSI: -15, T1: 2408152915, T2: 57332, T3: 2519483345, T4: 84180
[22] RTT: 6251, RSSI: -15, T1: 3041815915, T2: 57332, T3: 3537488345, T4: 84180
[23] RTT: 6250, RSSI: -15, T1: 3356591891, T2: 57376, T3: 3478232359, T4: 84224
[24] RTT: 6250, RSSI: -15, T1: 3115624595, T2: 57377, T3: 2238974087, T4: 84225
[25] RTT: 6251, RSSI: -15, T1: 2956657209, T2: 57378, T3: 3076160354, T4: 84226
[26] RTT: 7813, RSSI: -15, T1: 2347227897, T2: 57389, T3: 354178449, T4: 84228
[27] RTT: 6251, RSSI: -15, T1: 2557128979, T2: 57423, T3: 2676592534, T4: 84271
[28] RTT: 6251, RSSI: -15, T1: 2391161689, T2: 57424, T3: 2519728343, T4: 84272
```

Рис. 4. Вывод результатов измерения *RSSI* и *RTT*

Из рис. 4 видно, что измерения *RSSI* и *RTT* между ПУ и ТД были проведены 29 раз. В каждом цикле фиксировалось время отправки и приема сообщения, а также *RSSI*. На основании проведенных измерений устройство вычисляет средние показатели *RTT* и *RSSI*, на рисунке 4 эти значения выделены желтым цветом. При проведенном эксперименте среднее *RTT* = 7,4 нс, средний *RSSI* = -15 дБм. Также, на рисунке 4 показано рассчитанное расстояние  $d = 1,05$  м. Отклонение от истинного значения  $d$  составило 0,05 м. По результатам измерений можно сделать вывод о том, что устройство *ESP32* позволяет проводить первичные измерения *RSSI* и *RTT*, а также на их основе вычислять  $d$  между ПУ и ТД. В дальнейшем, полученные значения  $d$  могут быть использованы при решении задач ОМП в БЛС *Wi-Fi*.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы было проведено исследование возможности применения микроконтроллеров семейства *ESP32* в качестве основы для построения систем позиционирования в БЛС *Wi-Fi*. Показано, что основными подходами к оценке расстояния между ПУ и ТД являются методы на основе *RSSI* и *RTT*. В ходе эксперимента установлено, что *ESP32* могут выполнять роль ТД и ПУ. Успешно реализована процедура обмена сообщениями между устройствами и сбор первичных измерений *RSSI* и *RTT*, а также дальнейший расчет расстояния между устройствами. Измерения от множественных ТД в дальнейшем могут быть использованы для реализации системы ОМП ПУ в реальном времени с помощью трилатерации. Полученные результаты свидетельствуют о том, что платформа *ESP32* является перспективным и доступным инструментом для создания системы позиционирования в БЛС *Wi-Fi*.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Hailu T.G. et al. Theories and methods for indoor positioning systems: A comparative analysis, challenges, and prospective measures //Sensors. 2024. Т. 24. №. 21. С. 6876.
- [2] Антонович К.М., Карпик А.П. Мониторинг объектов с применением GPS-технологий и других методов определения положения //Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2003. №. 6. С. 123-135.

- [3] van Diggelen F. Indoor GPS theory & implementation //2002 IEEE Position Location and Navigation Symposium (IEEE Cat. No. 02CH37284). IEEE, 2002. С. 240-247.
- [4] Lashkari A.H., Parhizkar B., Ngan M.N.A. WIFI-based indoor positioning system //2010 Second International Conference on Computer and Network Technology. IEEE, 2010. С. 76-78.
- [5] Багаев Е.С. Нижняя граница точности измерения времени прихода сигнала в беспроводной локальной сети //Экономика и качество систем связи. 2025. Т. 4. №. 38. С. 77-95.
- [6] Киреев А.В., Фокин Г.А. Оценка точности локального позиционирования мобильных устройств с помощью радиокарт и инерциальной навигационной системы //Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. №. 4. С. 54-62.
- [7] Лизнева Ю.С., Кокорева Е.В., Костюкович А.Е. Прогнозирование местоположения мобильного абонента в сети Wi-Fi //Вестник СибГУТИ. 2022. №. 3 (59). С. 101-111.
- [8] Бородко А.В. Технологии локального позиционирования IoT устройств //Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Т. 9. №. 2. С. 21.
- [9] Багаев Е.С. Исследование технологии высокоточного позиционирования nanoLOC / Е.С. Багаев, П.А. Шаламов, Г.А. Фокин // Информационные технологии и телекоммуникации. 2025. Т. 13, № 2. С. 1-31.
- [10] Campos R.S., Lovisolo L. RF positioning: fundamentals, applications, and tools. Artech House, 2015.
- [11] Mistry H.P., Mistry N.H. RSSI based localization scheme in wireless sensor networks: A survey //2015 Fifth International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies. IEEE, 2015. С. 647-652.
- [12] Sadowski S., Spachos P. Rssi-based indoor localization with the internet of things //IEEE access. 2018. Т. 6. С. 30149-30161.
- [13] 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.
- [14] Dong Y. et al. Error investigation on Wi-Fi RTT in commercial consumer devices //Algorithms. 2022. Т. 15. №. 12. С. 464.
- [15] ESP-IDF Programming Guide [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/get-started/index.html> (Дата обращения 05.03.2026).
- [16] ESPRESSIF ESP-IDF [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/espressif/esp-idf> (Дата обращения 05.03.2026).