

**МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**  
**Кафедра инфокоммуникационных систем и сетей**

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

**Определение координат мобильного объекта в  
сверхширокополосной беспроводной сети**

Выполнил студент  
гр. Б01-107а

Г.Е. Милославов

Руководитель  
Должность преподавателя

Л.В. Кузьмин

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025г.

Долгопрудный  
2025

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	3
1. Проблема беспроводного определения координат внутри помещения . . . . .	3
2. Способы позиционирования внутри помещения . . . . .	3
3. Сверхширокополосные сигналы как средство для беспроводного определения координат объектов . . . . .	4
Глава 1. Структура СШП сети с возможностью определения координат объектов .	5
1.1. Структура сети . . . . .	5
1.2. Устройство модулей . . . . .	5
1.3. Способ определения расстояния между узлами сети по мощности сигнала	6
1.4. Способ определения координат объекта по нескольким маякам . . . . .	7
Глава 2. Эксперименты по определению координат в беспроводной СШП сети . .	8
2.1. Схема эксперимента . . . . .	8
2.2. Результаты экспериментальных данных . . . . .	8
Заключение . . . . .	9
0.1. Краткое перечисление конкретных результатов . . . . .	9
0.2. Реальная точность . . . . .	9
0.3. Область применения . . . . .	9
0.4. Вопросы дальнейшего развития технологии . . . . .	9

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **1. Проблема беспроводного определения координат внутри помещения**

Задача определения расстояния между узлами в беспроводных сетях является неотъемлемой частью функционирования такого рода сетей [1]. В настоящее время целый ряд систем и сетей для корректного функционирования требует определения расстояния между узлами сети, однако внутри помещения этот вопрос обстоит особенно остро, в силу технических и практических сложностей. Основные проблемы и их причины:

1. Отсутствие сигналов GPS/ГЛОНАСС из-за экранирования стенами и перекрытиями.
2. Низкая точность существующих систем на основе Wi-Fi, Bluetooth в силу многолучевого распространения.
3. Динамическая среда помещений может ухудшать точность, требуются частые калибровки устройств.

### **2. Способы позиционирования внутри помещения**

На данный момент самым популярным способом определения расстояния между объектами внутри закрытых помещений на сетях малых размеров является RSSI (Received Signal Strength Indication) – определение расстояния на основе измерения мощности сигнала, основываясь на квадратичное затухание мощности сигнала в зависимости от расстояния. Данный метод используется в современных протоколах Wi-Fi и Bluetooth [IEEE 802.11, IEEE 802.15.1], однако в силу многолучевого распространения сигнала в среде базовая реализация позволяет получить невысокую точность (средняя ошибка 1.1м со среднеквадратичным отклонением в 1.2м). Применение комбинированных фильтров в купе с данным подходом дают точность 0.5м со среднеквадратичным отклонением в 0.4м, однако такой подход сложен в программной реализации и требует повышенного расхода электроэнергии [<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11125043/>].

Ещё одним способом решения рассматриваемой проблемы является метод TOA (Time of Arrival) – определение расстояния, основанное на оценке времени прохождения сигнала между узлами сети. Данный метод имеет точно до 1м [<https://journals.ssau.ru/pwp/article>] однако сложно реализуем в техническом плане, из-за необходимости глобальной синхронизации часов. Аналогичная проблема возникает и для методологии TDOA (Time Difference of Arrival).

Существуют и другие методы определения координат, частично описанные в [<https://pub>], однако все из них имеют либо низкую точность, либо сложную техническую реализацию.

### **3. Сверхширокополосные сигналы как средство для беспроводного определения координат объектов**

В данной работе рассматривается метод использования сверхширокополосных сигналов для определения координат объектов, совмещающая в себе простоту технической реализации RSSI методологии и устойчивость таких сигналов к многолучевому распространению, что потенциально может привести к получению высокой точности внутри помещения. Известно [6,7], что данный метод определения расстояния позволяет достигать абсолютной точности около 20 см на расстояниях 10 метров внутри помещений или на открытой местности. Мощность излучаемого сигнала составляет около 10мВт.

На сегодняшний день получены принципиально результаты [6], которые описывают точность измерения расстояния с помощью такого метода, и влияние условий распространения на эту точность [7], полученные в макете, в котором имелся один излучатель и несколько приёмников сигнала. Приёмники сигнала соединены с компьютером проводным образом.

Цель настоящей работы заключается в разработке метода определения координат объекта относительно маяков в беспроводной сверхширокополосной сети за счёт оценки показателя затухания радиосигнала в месте расположения сети и определения мощности сигналов, которыми обмениваются узлы сети.

## ГЛАВА 1. Структура СШП сети с возможностью определения координат объектов

### 1.1. Структура сети

Сеть представляет из себя идентичные по устройству модули, делящиеся на мобильное устройство (МУ) и на якорные устройства. Мобильное устройство может свободно передвигаться в пространстве и в рамках эксперимента было подсоединено по COM-порту к управляющему устройству (ПК), то есть к компьютеру. Данные между ними передавались по UART протоколу. Устройства, идентичные МУ, расставлены на определённом расстоянии друг от друга и имеют фиксированное положение в пространстве. В дальнейшем, будем называть их якорями или якорными узлами (ЯУ).

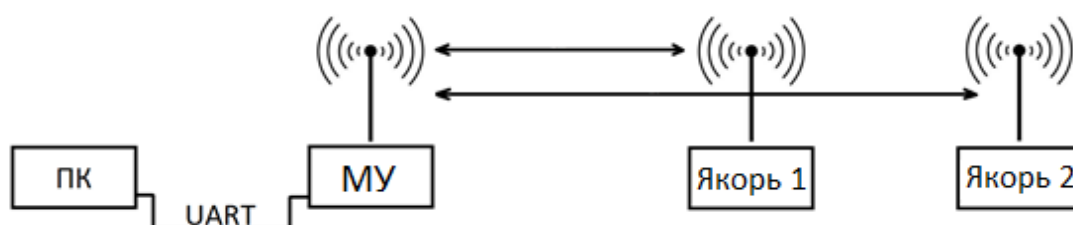


Рис. 1.1. Схематичное представление структуры сети с двумя якорями

По умолчанию все якорные узлы находятся в режиме прослушивания среды, а мобильное устройство находится в режиме ожидания команд от ПК. Общение между мобильным устройством и якорями осуществляется путём передачи управляющих команд от ПК и трансляцией этой команды в эфир СШП сигналами. Якорные устройства распознают команду и в зависимости от неё либо переходят в режим отправки сигналов, либо остаются в режиме прослушивания. Стоит заметить, что якоря между собой не общаются, поэтому управляющие команды нужны в том числе, чтобы они распознавали к кому в данный момент обращается мобильное устройство и отвечать ему строго по одному.

### 1.2. Устройство модулей

Модули представляют из себя сверхширокополосный модем, соединённый с платой Arduino Nucleo-F746ZG. Приемопередатчик на основе сверхширокополосных (СШП) хаотических радиоимпульсов состоит из следующих ключевых компонентов:

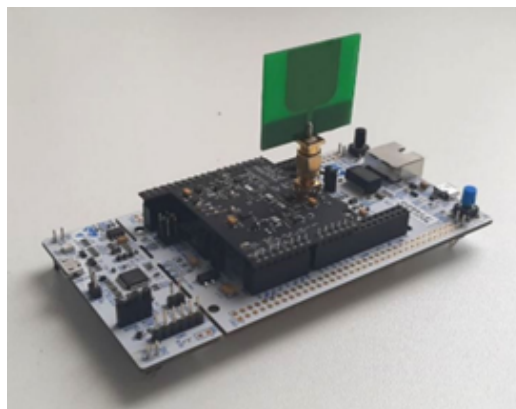


Рис. 1.2. Фото модуля

1. Генератор хаотического сигнала (CS): Формирует шумоподобный СШП сигнал в полосе частот 3–5 ГГц с выходной мощностью 12.5 dBm.
2. Усилитель мощности (PA): Усиливает сигнал перед передачей.
3. Антенна (ANT): Излучает модулированный сигнал в эфир.
4. Малошумящий усилитель (LNA): Усиливает принятый сигнал.
5. Логарифмический детектор (LD): Преобразует мощность сигнала в аналоговую огибающую.
6. Компаратор (CMP): Сравнивает огибающую с пороговым напряжением, формируя двухуровневый сигнал, который далее обрабатывается цифровыми методами.

Весь принцип работы модема описан в [<https://www.mdpi.com/2079-9292/12/21/4425>].

### 1.3. Способ определения расстояния между узлами сети по мощности сигнала

Схема измерения расстояния соответствует схемам, опубликованным в работах [6, 7], где описано разностный метод определения расстояния между беспроводными узлами за счёт определения относительного изменения мощности принимаемого сигнала при изменении расстояния между узлами сети. Данный метод берёт за основу закон затухания сигнала в беспроводном канале связи

$$P \sim \frac{1}{d^n}, \text{ откуда следует выражение } P_d = P_0 + 10n \lg \frac{d}{d_0},$$

где  $P_0$  – известная мощность сигнала на заданном расстоянии  $d_0$

Также для точного определения расстояния между узлами сети необходимо знать коэффициент затухания среды  $n$ , который может отличаться в зависимости от помещения и расстановки внутри него. Поэтому к тому, что нужно произвести одно измерение для  $P_0$  и  $d_0$ , в силу того что метод является разностным, также необходимо произвести как минимум ещё одно измерение.

Однако так как для преобразования полученного сигнала в аналоговую огибающую используется логарифмический детектор, то измеряется не напрямую мощность, а амплитуда сигнала  $A = hP$ , которая связана с мощностью коэффициентом пропорциональности  $h = 21\text{мВ/дБ}$ .

Итого, имея среднее значение амплитуды сигнала на логарифмическом детекторе  $A$  и все остальные величины после произведения калибровки, можно записать явную

формулу

$$d = d_0 * 10^{\frac{A-A_0}{10*h*n}}$$

Подробное изложение статистического метода измерения амплитуды с помощью логарифмического детектора и компаратора описано в [6-7], однако для общего понимания, предоставлен график напряжения на логарифмическом детекторе с выделенными отсчётами, по которым считалась амплитуда. Зелёным пунктиром обозначено медианное значение выделенного множества, которое по итогу и считалось за амплитуду сигнала

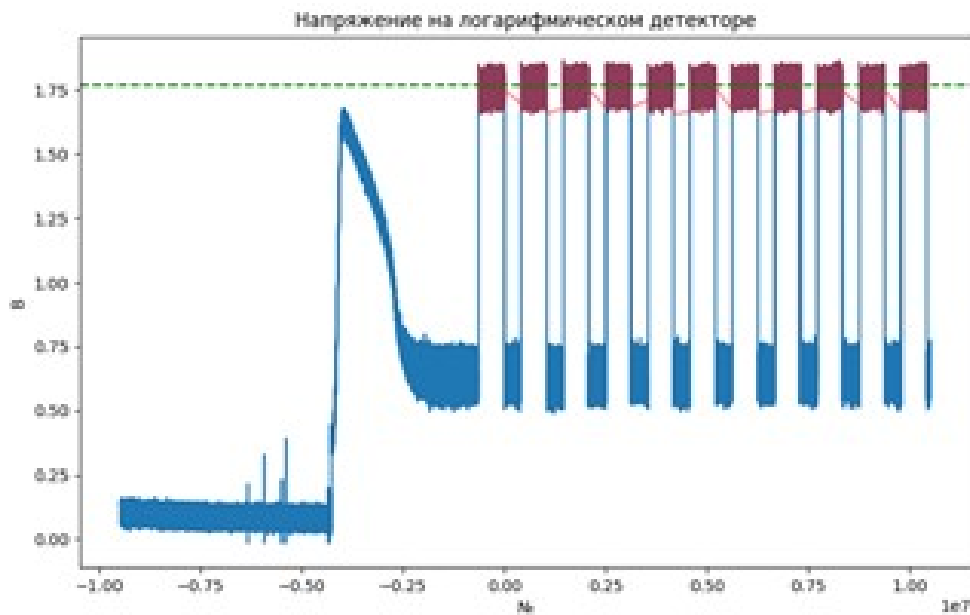


Рис. 1.3. Сигнал на выходе логарифмического детектора в якорном узле, амплитуда которого пропорциональна мощности принимаемого сигнала

#### 1.4. Способ определения координат объекта по нескольким маякам

Теперь, имея возможность узнать расстояния до всех маяков, необходимо получить значение координат объекта. В пределах 1D пространства достаточно использовать метод среднего арифметического

$$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i \pm d_i)$$

где  $x_i$  — известные координаты маяков,  $d_i$  — измеренные расстояния. Данный подход минимизирует сумму квадратов ошибок, и одновременно с этим является вычислительно простым.

## **ГЛАВА 2. Эксперименты по определению координат в беспроводной СШП сет**

### **2.1. Схема эксперимента**

### **2.2. Результаты экспериментальных данных**



## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

**0.1. Краткое перечисление конкретных результатов**

**0.2. Реальная точность**

**0.3. Область применения**

**0.4. Вопросы дальнейшего развития технологии**