

# Лекция №8: Позиционирование мобильных объектов

---

## План лекции:

- I Назначение и виды систем определения местоположения.
- II Глобальные системы позиционирования.
- III Системы локального позиционирования.
- IV Применение нейронной сети для позиционирования мобильного объекта.



---

## I НАЗНАЧЕНИЕ И ВИДЫ СИСТЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ

---

С древних времён человеку было необходимо умение находить своё местоположение в пространстве, чтобы возвращаться домой с охоты, найти соплеменников, определить новое место для зимовки и пр. В знакомой местности для этой цели использовались наземные объекты – знакомое дерево, камень особенной формы, ручей и т.д. В незнакомой – человек учился определять «координаты» и направления по солнцу, звёздам, луне.

В современном мире существует большое количество систем, применяющих позиционирование:

- **службы, основанные на локации, LBS** (англ. *Location-based service*):
  - ☺ навигация на местности;
  - ☺ медицинская помощь;
  - ☺ интернет вещей;
  - ☺ родительский контроль;
- **системы безопасности:**
  - ☺ обнаружение места взлома и вторжения;
  - ☺ контроль физической активности;
  - ☺ определение местонахождения людей в запрещённых и/или опасных местах;
- **производственные системы:**
  - ☺ транспорт и логистика;

- ☺ умные производства (дороги, города...);
- ☺ робототехника и пр.

## **Виды систем определения местоположения:**

Выделяют два основных вида систем локации:

- **системы спутниковой навигации** и позиционирования (**глобальные системы**): GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS, IRNSS;
- **локальные системы:**
  - ☺ радиочастотные системы;
  - ☺ инфракрасные и ультразвуковые системы.

## **Физические параметры в основе систем локации**

Различные методы позиционирования мобильного объекта базируются на измерении различных физических параметров и вычислении его координат.

К таким параметрам относятся:

– **уровень мощности сигнала** RSS (англ. *Received Signal Strength*). Плотность мощности электромагнитной волны в свободном пространстве прямо пропорциональна мощности излучаемого передатчиком сигнала и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника (**закон обратных квадратов**). В качестве показателя этой величины в мобильном устройстве или на базовой станции выступает **индикатор уровня принимаемого сигнала**, RSSI (англ. *Received Signal Strength Indicator*).

– **время полёта** TOF (англ. *Time Of Flight*). Расстояние между передатчиком и приёмником определяется как  $r = t * c$ , где  $c$  – это скорость света,  $c = 3 * 10^8$  м/с.

В этом случае расстояние может определяться:

☺ по **времени прибытия** TOA (англ. *Time Of Arrival*) сигнала к приёмнику, когда время начала передачи известно;

☺ по **фазе принятого сигнала** POA (англ. *Phase Of Arrival*), которая связана с задержкой распространения и расстоянием через длину волны и скорость света.

☺ с помощью **относительного времени прибытия** TDOA (англ. *Time Difference Of Arrival*). Измеряется время распространения сигнала от передатчика до приёмника и обратно, причём только по часам передающего устройства, поэтому отсутствует необходимость синхронизации передатчика и приёмника;

– **угол прибытия** AOA (англ. *Angle Of Arrival*) или **направление прибытия** DOA (англ. *Direction Of Arrival*). Угол или направление прихода волны может быть оценено по диаграмме направленности антенны. Для определения местоположения требуется как минимум два измерения AOA (с разных точек) или измерение нескольких параметров одновременно (AOA и TOF или RSS).

- **разность фаз** между электрическим и магнитным полем.

В ближней зоне антенны передатчика эта величина зависит от расстояния до источника и позволяет это расстояние вычислить.

## II ГЛОБАЛЬНЫЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

## СИСТЕМЫ

Системы глобального позиционирования, основанные на применении искусственных спутников земли и спутниковой связи, позволяют определять местоположение объектов с высокой точностью, вплоть до нескольких сантиметров, но имеют ограничения в применении. Например, внутри помещений точность геолокации значительно снижается из-за плохого проникновения сигнала через препятствия (перегородки, перекрытия, мебель и пр.), а также из-за влияния многолучевого распространения сигнала в результате многократного его переотражения от этих препятствий.



### 2.1 Виды спутниковых систем навигации и позиционирования

Разные страны в своё время разрабатывали и внедряли собственные спутниковые навигационные системы для применения в своих регионах.

Наиболее известные из них:

- ☺ GPS (США);
- ☺ ГЛОНАСС (Российская Федерация);
- ☺ Galileo (страны ЕС);
- ☺ Beidou (Китай);
- ☺ IRNSS (Индия) находится в стадии разработки;
- ☺ Quase-zenith (Япония) для использования в Юго-Восточной Азии (QZSS).

#### **GPS**

Глобальная система позиционирования (англ. *Global Positioning System*), разработанная в США, служит для определения координат объекта, скорости и направления его движения.

Параметры системы:

Действующих спутников: 31 из 32.  
Размеры спутника: более 5 м.



Масса: 1 т.

Расчётное время на орбите: 7-8 лет.

Рис. 8.1 демонстрирует этапы, которые прошла глобальная система позиционирования GPS в своём развитии.

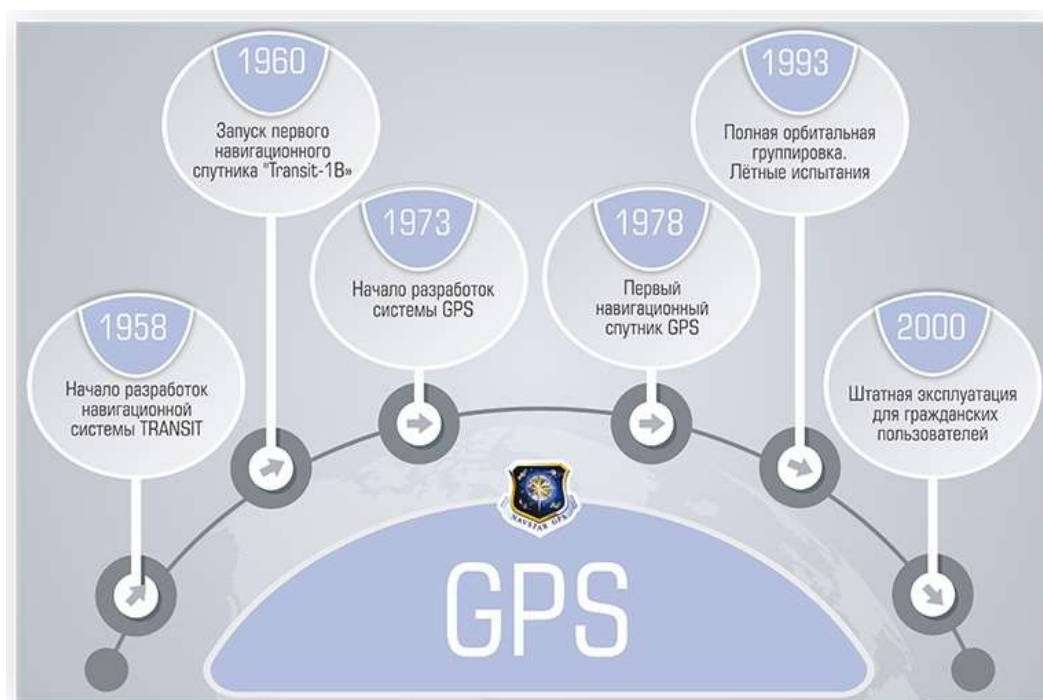


Рис. 8.1. Этапы создания и развития Глобальной системы позиционирования

## **ГЛОНАСС**

ГЛОНАСС – ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система разработана в РФ. На данный момент сигнал можно получить на 90% территории России и на 60% остального земного шара.

### Параметры системы:

Действующих спутников: 24.  
Размеры спутника: около 8 м.  
Масса: 1,5 т.  
Расчётное время на орбите: 3-5 лет.



Главное отличие GPS и ГЛОНАСС состоит в разности способов разделения каналов передачи информации от спутников. В системе GPS способ разделения каналов **кодовый**, а в ГЛОНАСС – **частотный**. И в GPS и в ГЛОНАСС для работы необходимо 24 основных и 3 резервных спутника.

Этапы развития ГЛОНАСС приведены на рис. 8.2.



Рис. 8.2. Этапы создания и развития Глобальной навигационной системы

### **Galileo**

Разработка ЕС является альтернативой и дополнением глобальной системы определения местоположения США (GPS) и российской спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС.

**Требуется** спутников: 30 (24 активных + 6 в горячем резерве).

**Имеется:** 23 исправны (1 в стадии ввода в эксплуатацию 06/2022), 1 недоступен, 3 неисправны.



На рис. 8.3 можно видеть этапы создания и развития, которые прошла система позиционирования Galileo.

### **Beidou**

В конце сентября 2022 года Россия и Китай подписали контракты на взаимное размещение станций навигационных систем ГЛОНАСС и Beidou. Предполагается, что российское оборудование будет размещено в городах Чанчунь, Урумчи и Шанхай, а китайское – в Обнинске, Иркутске и Петропавловске-Камчатском. Сроки окончания строительства не называются.

Аппараты системы Beidou делятся на три поколения, а сама платформа в полностью завершённом виде насчитывает 24 спутника на средней околоземной орбите: по восемь в трех орбитальных плоскостях, не считая резервных.

Кроме того, есть три спутника на наклонных геосинхронных орбитах и три – на геостационарных орбитах. Таким образом, система насчитывает 30 спутников.



Beidou используется как в военных, так и в гражданских целях.

Этапы развития Beidou приведены на рис. 8.4.



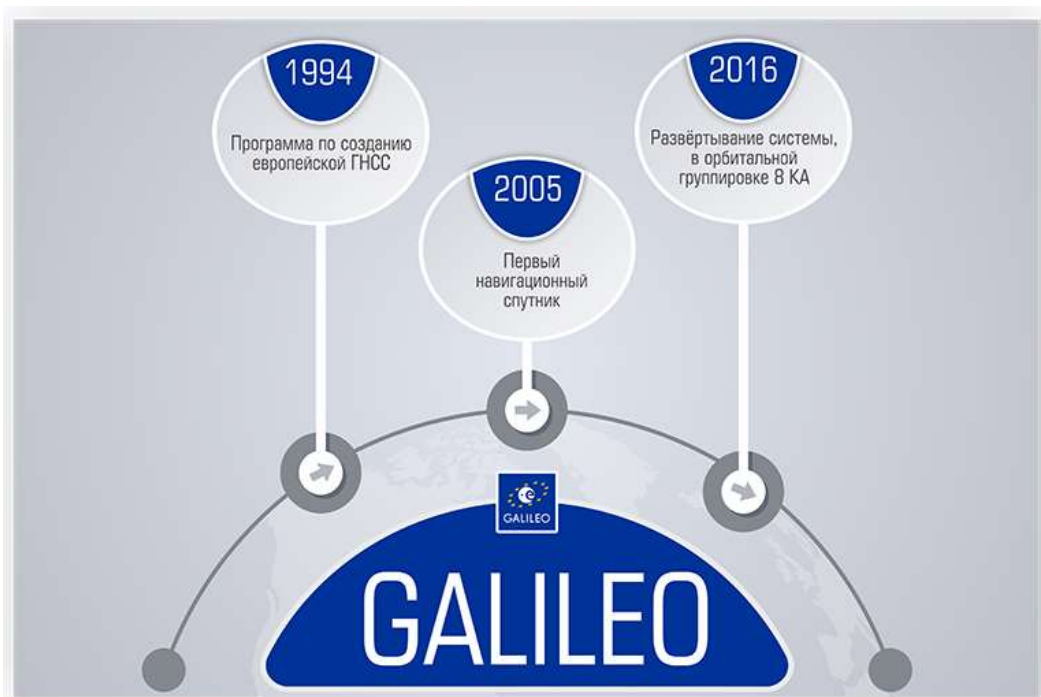


Рис. 8.3. Этапы создания и развития системы Galileo

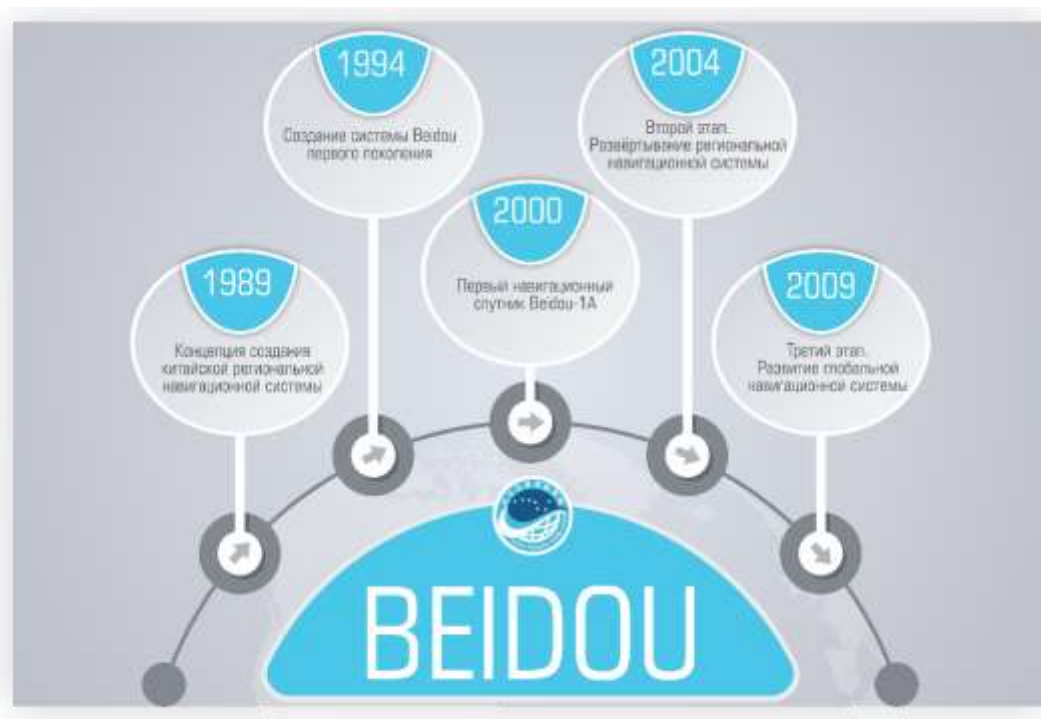


Рис. 8.4. Этапы создания и развития системы Beidou

## 2.2 Структура систем спутникового позиционирования

В общем случае структура системы спутникового позиционирования и навигации включает в себя следующие компоненты (рис. 8.5):

- Подсистема наземного контроля и управления (НКУ):  
 ☺ станции слежения за спутниками;

- ☺ служба точного времени;
- ☺ вычислительный центр;
- ☺ станция загрузки данных на борт космических аппаратов (КА);

– Подсистема космических аппаратов:

Каждый спутник имеет несколько атомных эталонов частоты и времени и приёмо-передающую аппаратуру.

– Аппаратура пользователей.

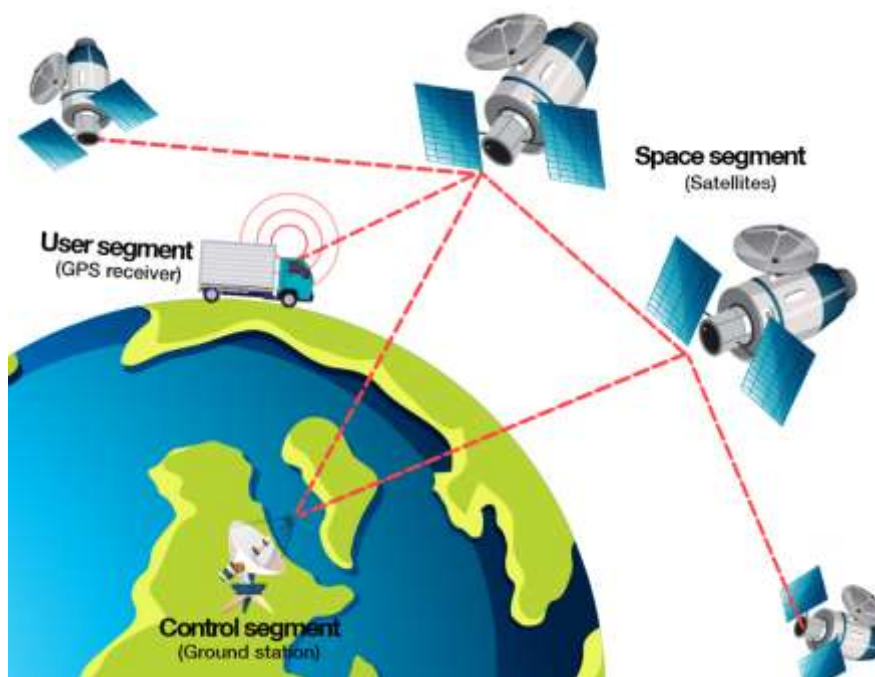


Рис. 8.5. Сегменты спутниковой системы

## 2.3 Принцип определения местоположения

КА исполняют роль геодезических опорных пунктов – их координаты должны быть известны в каждый момент, когда производятся измерения.

Координаты объекта определяются методом **трилатерации** или **мультилатерации**, который применяется не только в системах глобального позиционирования (рис. 8.6).

Расстояния от спутников до объекта являются радиусами сфер, в центрах которых расположены КА. Объект располагается в точке пересечения этих сфер.

Для точного определения трёх пространственных координат объекта необходимо участие как минимум трёх спутников, расстояния до которых применяются в составлении и решении системы уравнений трёх сфер.

### Уравнения трёх сфер:

Ф (8.1) представляет собой систему уравнений трёх сфер для вычисления координат мобильного объекта.

$$\begin{aligned}
 r_1^2 &= (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 \\
 r_2^2 &= (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 \\
 r_3^2 &= (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2
 \end{aligned}
 \tag{8.1}$$

где  $r_1, r_2, r_3$ , – расстояния между мобильным объектом и спутниками;  
 $x_i, y_i, z_i$  – координаты спутников;  
 $x, y, z$  – координаты целевого объекта, относительно которых решается система уравнений.

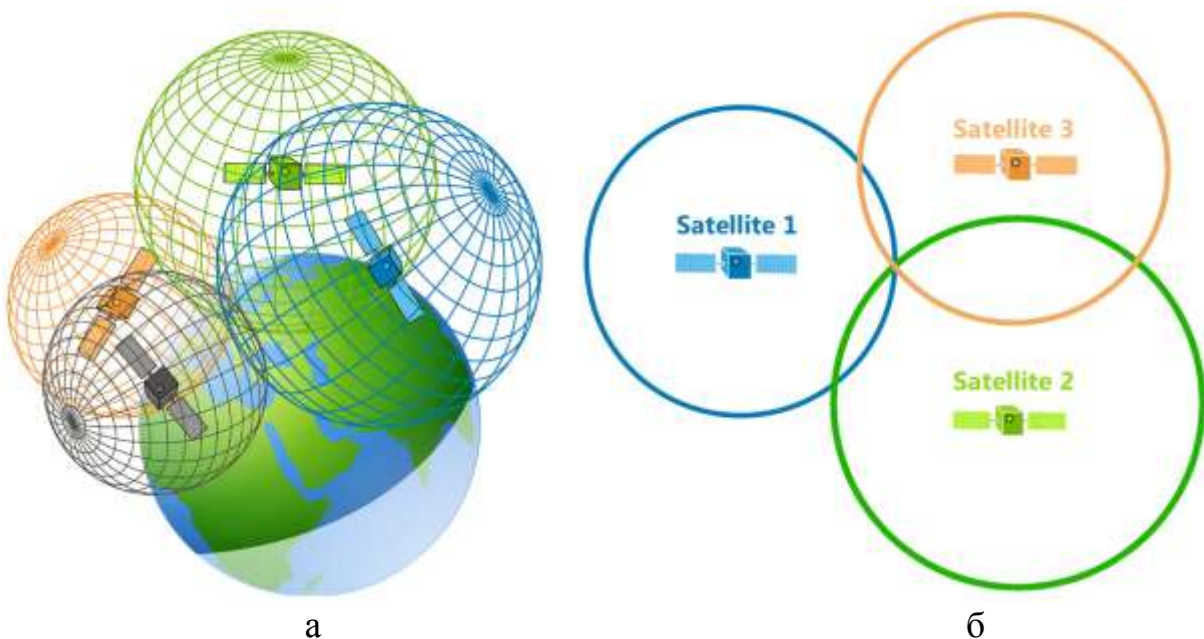


Рис. 8.6. Механизм латерации (трилатерации): а – в пространстве; б – на плоскости

### **Определение расстояний:**

Расстояния от объекта до спутников определяются по времени распространения сигнала от передатчика на спутнике до приёмника на АП (TOF).

Передатчик на спутнике работает непрерывно, а приёмник по мере необходимости.

Часы должны быть строго синхронизированы. Часы на приёмнике не выверены по атомным часам КА, поэтому расстояния искажены. Их называют *псевдодальностями*.

Чтобы скорректировать расстояния используют сигналы не от трёх, а от большего числа спутников, например, четырёх.



Задачу определения местоположения мобильного объекта внутри зданий решают системы локального позиционирования, которые часто проигрывают в точности спутниковым системам, но являются менее финансово затратными и более эффективны в помещениях.

На рис. 8.7 представлены основные виды систем локального позиционирования.



Рис. 8.7. Виды локальных систем позиционирования

### 3.1 Методы локального позиционирования в сетях Wi-Fi

Особое место среди систем локального позиционирования занимают системы, базирующиеся на стандартах IEEE 802.11, благодаря широкому распространению сетей Wi-Fi в организациях, учреждениях, производственных объектах, развлекательных центрах и др.

Система в общем случае состоит из комплекта точек доступа AP (англ. *Access Point*), количество которых зависит от размеров и конфигурации помещения, подключённых через коммутатор к серверу определения местоположения, который обрабатывает поступающую от клиентов через AP информацию, вычисляет их координаты и, как правило, в графическом виде сообщает клиентам их местоположение (рис. 8.8).

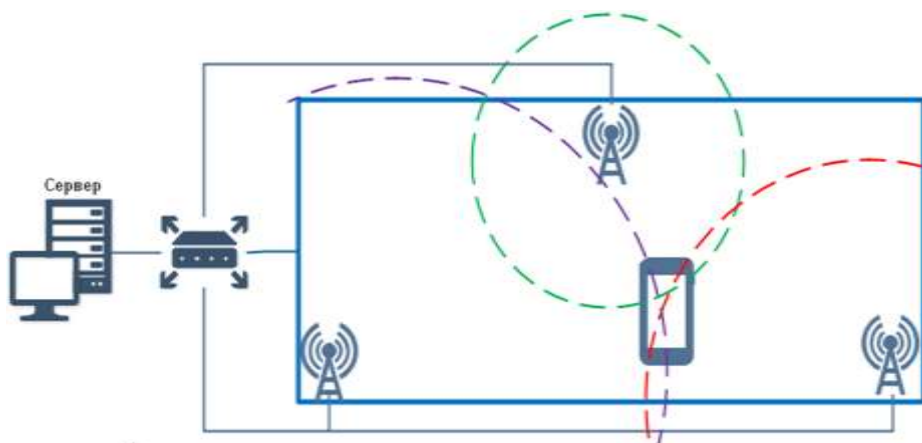


Рис. 8.8. Система определения местоположения Wi-Fi

Ниже представлены различные механизмы определения местоположения в сетях Wi-Fi

### **Ближайшей точки доступа**

Абоненту присваиваются координаты той точки доступа, от которой поступил сигнал наибольшей мощности (рис. 8.9). Главное достоинство метода заключается в простоте его реализации и низкой вычислительной сложности, поскольку для определения местоположения абонента необходимо знание только двух параметров: уровня мощности сигнала, поступающего от AP, и её координат.

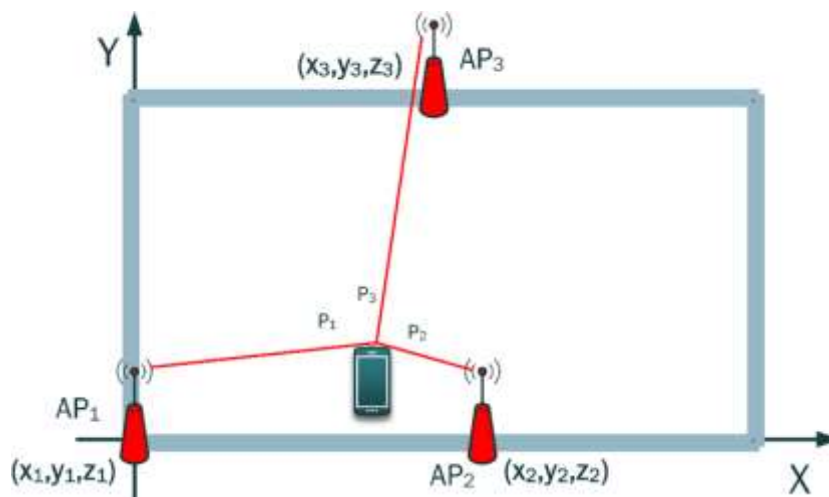


Рис. 8.9. Механизм ближайшей точки доступа

Главный недостаток – очень низкая точность позиционирования, т.к. погрешность измерения может достигать дальности распространения сигнала от точки доступа (до десятков метров). Отсюда вытекает существенное условие: чтобы алгоритм показывал удовлетворительные результаты, приходится использовать избыточное количество точек доступа.

### **Сравнения с образцом**

Метод *сравнения с образцами* (англ. *Fingerprinting*) базируется на том, что

для каждого возможного местоположения устройства снимаются и заносятся в базу данных значения некоторого параметра сигнала, например, показателя уровня принимаемого сигнала RSSI (англ. *Received Signal Strength Indicator*). После чего определение местоположения пользователя происходит путём сравнения текущего значения параметра RSSI с шаблонами из базы и выбора наиболее вероятной локации (рис. 8.10).

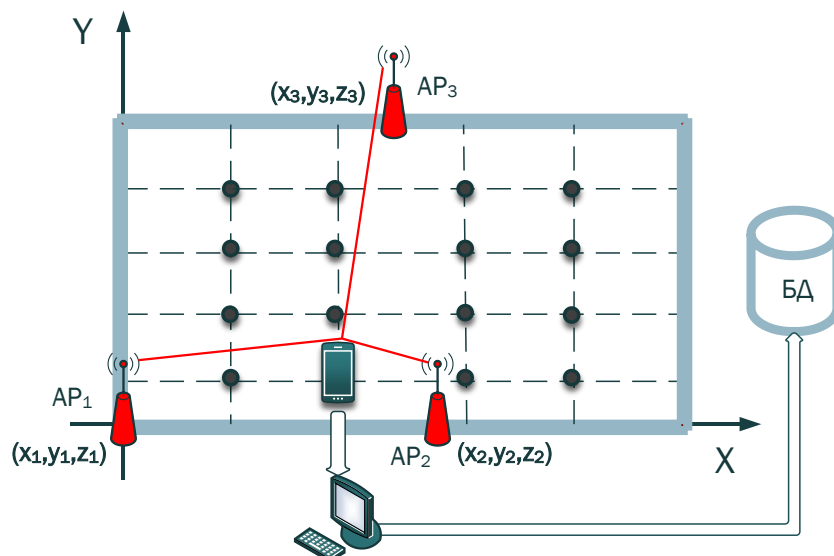


Рис. 8.10. Механизм сравнения с образцом

Этот метод требует достаточно трудоёмкой предварительной работы по сбору образцов, зато на его эффективность не влияют такие проблемы, как отсутствие прямой видимости между приёмником и передатчиком. Кроме того, параметр RSSI удобен тем, что измеряется любым устройством. Выбор RSSI в качестве измеряемого параметра даёт возможность реализовать систему определения местоположения в уже установленной сети, не внося в неё существенных изменений.

## **Ангуляции**

Метод ангуляции использует понятие *угла прибытия* AOA (англ. *Angle Of Arrival*) сигнала. На двух или более точках доступа с известными координатами измеряются углы прибытия сигналов на приёмник. По измеренным направлениям вычисляются координаты подвижного объекта. Чем больше точек доступа задействовано, тем точнее результат (рис 8.11).

В случае, когда точек доступа две, координаты объекта  $(x, y)$  вычисляются следующим образом:

$$y = \frac{y_2 \cdot \tan(\theta_2) - x_2}{\tan(\theta_2) - \tan(\theta_1)}, \quad x = y \cdot \tan(\theta_1), \quad (1)$$

где  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – углы прибытия сигналов от первой и второй точек доступа,

измеренные относительно севера,  $x_2, y_2$  – координаты второй точки доступа.

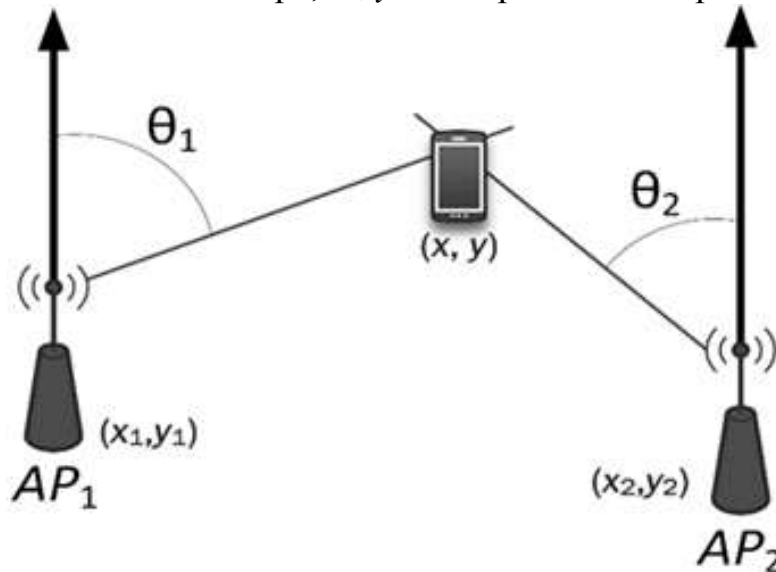


Рис. 8.11. Механизм ангуляции

Для измерения угла прибытия точки доступа должны иметь сложные в производстве направленные антенны, которые в Wi-Fi устройствах настолько редко встречаются, что среди известных представителей можно назвать только Cisco Aironet. Кроме того, этот метод определения местоположения обеспечивает достоверные результаты при нахождении всех задействованных устройств в зоне прямой видимости. Сильное влияние на определение угла прибытия может оказывать любое препятствие между точкой доступа и приёмным устройством, например, человеческое тело.

### **Латерации**

Латерация может осуществляться в виде следующих алгоритмов:

– **круговая или сферическая** латерация позволяет вычислить расстояния  $r_i$  от искомой точки до  $AP_i$  решением системы уравнений вида:

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}, \quad (8.2)$$

где  $(x, y, z)$  – координаты целевого объекта;

$(x_i, y_i, z_i)$  – координаты  $i$ -й точки доступа  $AP_i$ ;

– **гиперболическая** латерация основывается на разнице расстояний  $d_{ij}$  между передатчиками нескольких точек доступа (например, двух) и приёмником мобильного объекта. Вычисление координат объекта сводится к решению системы уравнений вида:

$$d_{ij} = r_i - r_j = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} - \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_j)^2}, \quad (8.3)$$

где  $r_i$  и  $r_j$  – расстояния от точек доступа  $AP_i$ , и  $AP_j$ , соответственно, до искомого объекта;

$(x, y, z)$  – координаты целевого объекта;

$(x_i, y_i, z_i)$  – координаты  $AP_i$ ;

$(x_j, y_j, z_j)$  – координаты  $AP_j$ ;

– **дифференциальная** латерация является альтернативой предыдущих алгоритмов и представляет собой метод аппроксимации, основанный на переборе возможных координат объекта с целью нахождения точки, ближайшей к месту пересечения сфер. В качестве объекта минимизации используется функция, описывающая затухание сигнала от точки доступа в зависимости от расстояния. Данный метод предоставляет высокую точность измерений, но платой за это является большая вычислительная сложность алгоритма.

С точки зрения компромисса между простотой реализации, вычислительной сложностью и допустимой точностью наиболее подходящим представляется метод сферической трилатерации, который подробно описан в разделе II, только здесь вместо спутников используются точки доступа Wi-Fi (рис. 8.12).

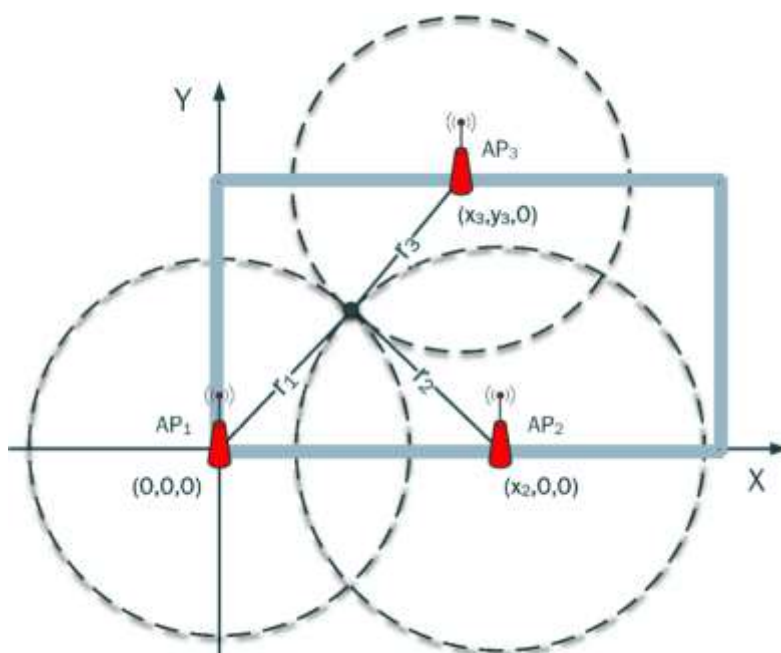


Рис. 8.12. Механизм трилатерации

### 3.2 Методы локального позиционирования на основе RFID

**Радиочастотная идентификация** RFID (англ. *Radio Frequency Identification*) – технология бесконтактного считывания информации на расстоянии. Она позволяет узнать точное местонахождение объекта.



Объектами отслеживания являются товары на складе или в магазине, детали на производстве, люди в офисном здании или на мероприятии, материалы и основные средства организации, автомобили и др.

Принцип действия системы радиочастотной идентификации базируется на использовании **считывателей** и специальных **RFID-меток** (транспондеров), которые крепятся в виде бирок, наклеек, этикеток на отслеживаемые активы.

Периодически считывающее устройство рассылает сигналы, а метки используют радиочастотное излучение для отправки ответов с информацией для идентификации (рис. 8.13).

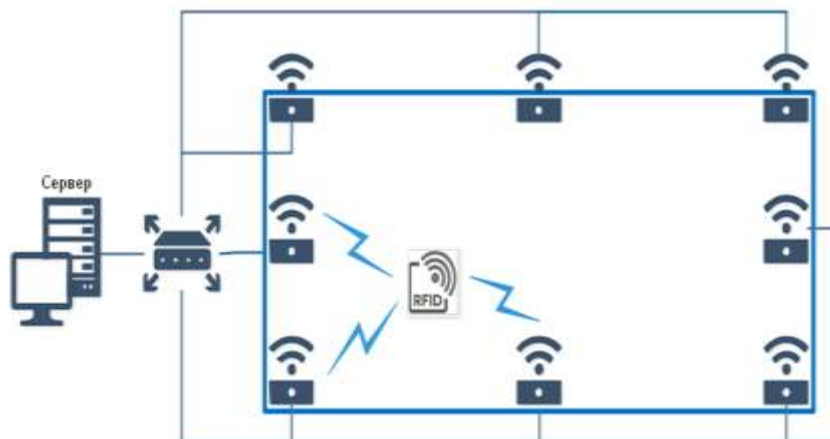


Рис. 8.13. Структура системы позиционирования RFID

### **Элементы системы RFID**

- RFID-метка с чипом;
- RFID-антенны;
- Программное обеспечение.



### **Виды RFID меток**

Можно определить несколько критериев, по которым различают системы RFID:

#### **1) по источнику питания:**

☺ **АКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ** – микрочипы питаются от внутренних батарей;

☺ **ПАССИВНЫЕ СИСТЕМЫ** – микрочипы питаются от считывателей, у них нет внутреннего источника питания;

☺ **БАТАРЕЙНЫЕ ПАССИВНЫЕ СИСТЕМЫ** – гибрид между активными и пассивными системами, микрочипы содержат небольшую батарею.

#### **2) по частоте:**

☺ **НИЗКОЧАСТОТНЫЕ** микрочипы или LF работают на частотах 400 кГц или менее (от 125 кГц до 134,2 кГц);

☺ **ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ** микрочипы или HF (13,56 МГц);

☺ **СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ** микрочипы или UHF (800-900 МГц).

3) **по типу чипа:**

☺ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ СТИРАЕМОЕ ПЕРЕПРОГРАММИРУЕМОЕ ПЗУ EEPROM (англ. *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*), которое существует в двух видах:

☹ ОТП (англ. *One-Time Programmable*) – одноразово программируемый, перезапись заблокирована;

☹ WMRM (англ. *Write-Many Read-Many*) – перепрограммируемый, если перезапись разблокирована;

☺ ТОЛЬКО ДЛЯ ЧТЕНИЯ ROM (англ. *Read-Only Memory*), запрограммирован на заводе-изготовителе.

4) **по виду модуляции:**

☺ АМПЛИТУДНАЯ МАНИПУЛЯЦИЯ ASK (англ. *Amplitude Shift Keying*);

☺ ЧАСТОТНАЯ МАНИПУЛЯЦИЯ FSK (англ. *Frequency Shift Keying*);

☺ ФАЗОВАЯ МАНИПУЛЯЦИЯ PSK (англ. *Phase Shift Keying*).

5) **по типу передачи:**

☺ ПОЛНОДУПЛЕКСНАЯ СВЯЗЬ – передатчики и считыватели одновременно отправляют и получают информацию;

☺ ПОЛУДУПЛЕКСНАЯ СВЯЗЬ – передатчик и считыватель должны чередовать отправку и не могут одновременно отправлять и получать информацию.

**Достоинства RFID систем**

☺ высокая скорость работы системы – быстрое (за долю секунды) считывание данных, их перезапись и передача.

☺ возможность перезаписи информации – есть метки, на которые можно перезаписывать данные неограниченное количество раз.

☺ возможность бесконтактной работы – нахождение метки в зоне прямой видимости ридера не требуется.

☺ устойчивость к внешним условиям – RFID метки надёжны в эксплуатации за счет высокого уровня защиты от пыли, влаги, высоких температур.

☺ распознавание данных на большом расстоянии – диапазон считывания RFID метки от нескольких см до 300 м в зависимости от модели.

☺ безопасность и конфиденциальность записанной информации – данные засекречиваются благодаря уникальному ID-коду чипа.

☺ объем хранящейся информации – некоторые RFID метки могут хранить практически неограниченное количество данных.

☺ чтение нескольких меток – считыватель может быстро распознавать сразу несколько RFID меток, находящихся в его зоне чтения.

☺ возможность выполнения интеллектуальных задач – помимо передачи и хранения информации, RFID метка может передавать данные о перемещении товара, а также об окружающей среде (измерять температуру, давление).

☺ высокая точность считывания – RFID технология обладает 100% точностью.

☺ возможности размещения считывателя – ридер RFID может крепиться как на неметаллических, так и на металлических поверхностях, а также внутри неметаллической конструкции.

☺ возможность скрытого размещения – RFID чип может встраиваться или вшиваться в объект.

### **Недостатки RFID систем**

☺ невозможность размещения под токопроводящей поверхностью – сигнал экранируется, что мешает корректному считыванию.

☺ электромагнитные поля создают помехи для RFID – качество работы системы радиочастотной идентификации может ухудшаться вблизи включённых компьютеров и других приборов, создающих электромагнитные поля.

☺ взаимные коллизии – при наличии двух или более меток в поле считывателя. Этот недостаток можно устранить, используя специальный алгоритм антиколлизии.

☺ стоимость RFID меток – если сравнивать со штрих-кодированными этикетками, стоимость RFID меток выше.

### **3.3 Ultra-Wide-Band (UWB)**

**UWB-сигналы** распознаются как любые сигналы с шириной спектра свыше 500 МГц и диапазоном от 3,1 до 10,6 ГГц. Они достаточно слабые (41,5 дБм/МГц), поэтому не требуют лицензирования ГКРЧ.



Внедрение технологии не требует соблюдения условия прямой видимости и осуществляется с использованием всего нескольких внешних компонентов.

UWB является дорогим техническим решением, обеспечивающим установку трекеров с возможностью определения местоположения до 10 см.

**Сверхширокополосная технология** UWB используется в случаях, когда необходима высокая точность отслеживания. Система базируется на использовании электромагнитного излучения и позволяет контролировать объекты с точностью до сантиметрового уровня.

UWB помогает решать задачи отслеживания объектов, контролировать перемещение персонала, повышать уровень охраны труда.

В большинстве случаев технологию UWB применяют в промышленности и

складской сфере (для контроля перемещения товаров на складе отгрузки). При её использовании можно чётко определять расположение каждой единицы инвентаря, что обеспечивает сохранность и безопасность объектов на предприятии.

На каждый отслеживаемый актив помещается специальная метка со встроенным или подключаемым аккумулятором. В процессе своей работы метка принимает миллиарды радиоимпульсов, которые рассылаются с интервалом в наносекунды в широком частотном спектре.

Приёмник или приёмопередатчик принимает эти сигналы и преобразует их в информацию, которая позволяет вычислять местоположение объекта. Точность позиционирования объектов может составлять от 10 до 30 см.

В зависимости от потребностей UWB трекинг можно использовать с такими методиками расчёта, как AOA (англ. *Angle Of Arrival*), TDOA (англ. *Time Difference Of Arrival*), TWR (англ. *Two-Way-Ranging*) или PDOA (англ. *Phase Difference of Arrival*).

К преимуществам технологии относятся:

- ☺ высокая точность позиционирования;
- ☺ одновременная поддержка десятков и даже сотен каналов;
- ☺ широкий диапазон масштабирования;
- ☺ быстрое и удобное развёртывание.

Недостатки:

- ☺ сверхширокая полоса и высокая мощность – помеха другим сетям связи;
- ☺ малая длительность сигнала – сложность синхронизации и приёма.

### 3.4 iBeacon

Технология iBeacon работает посредством Bluetooth и предусматривает установку в помещении маяков, которые периодически рассылают сигналы. Они имеют миниатюрные размеры, поэтому используются для широкого спектра геолокационных решений.



Как только пользователь появляется в зоне рассылки, ему на смартфон приходят оповещения, которые могут содержать полезную информацию или рекламу. Смартфон при этом должен иметь специальное приложение.

Сценарий применения маячков аналогичен Wi-Fi, но отличается способом подключения мобильных устройств. Технологию можно использовать для построения интерактивных карт, прокладывания маршрутов к необходимым объектам, получения аналитики о перемещениях посетителей.

Преимущества iBeacon:

- ☺ поддержка технологии большинством современных телефонов;
- ☺ возможность строить инфраструктуру на основе доступного и

недорогого оборудования;

☺ простое управление системой без наличия специфических знаний и навыков;

☺ энергоэффективность, низкие затраты энергоресурсов (батарейки на маячке хватает на 2–3 года);

☺ возможность создания персонализированных уведомлений;

☺ доступность, простота установки и развёртывания системы;

☺ простое управление системой без наличия специфических знаний и навыков;

☺ определение местоположения с точностью до нескольких метров.

#### Недостатки iBeacon:

☺ небольшая дальность работы (в среднем до 30 метров);

☺ необходимость использования приложений для клиентских решений;

☺ привлечение дополнительного оборудования.

iBeacon отличается универсальностью и подходит для внедрения в любую сферу. На основе технологии можно создавать эффективные мобильные приложения для магазинов, аэропортов и вокзалов, больниц, офисов, транспортных компаний.

### **3.5 Оптические и Инфракрасные технологии**

Данные технологии имеют специализированное применение в основном для определения подвижности стационарных объектов.

**Инфракрасные технологии** используют электромагнитное излучение по длине волны большее, чем видимый свет.

Принцип работы основан на диоде в инфракрасном спектре, который излучает невидимый глазу свет и фотодиодном приёмнике, принимающем импульс света.

**Оптические технологии** – это форма электромагнитного излучения, отличающегося по своим физическим свойствам. Они имеют ограничения при отсутствии видимости луча света.

#### **VLC Visible Light Communication**

Технология VLC использует спектр видимого света для передачи данных (рис. 8.14).

**Светодиодные лампочки** лучше всего подходят на роль передатчиков данных. Возможности передачи данных кроются в **импульсе** – незаметном для глаза включении и отключении света.

Каждая лампочка имеет свою степень мерцания, таким образом приёмный сенсор получает свет и сравнивает с модуляцией света относительно закодированных схем. Таким образом пользователь, имеющий сенсор, может определить своё местоположение.



Самый распространённый приёмник для пользователя – это мобильный телефон с камерой, которая определяет частоту мерцания света.

Известные вендоры, которые предлагают решения VLC: Philips, Gelighting и ByteLight.



Рис. 8.14. Пример VLC системы

### 3.6 Ultrasound

**Ультразвуковая технология** Ultrasonic location based system использует звуковые колебания ниже 20 кГц, которые ниже чувствительности человеческого уха.

Принцип работы – **эхолокатор**, который основан на измерении времени прохождения отражённого сигнала (рис. 8.15).

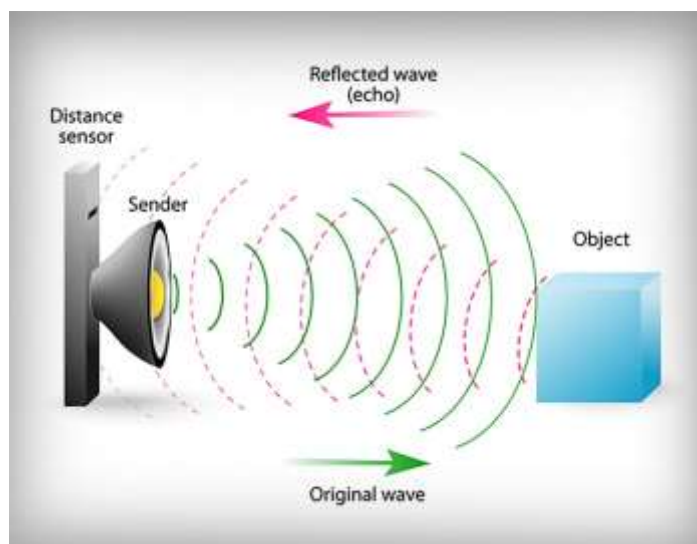


Рис. 8.15. Эхолот Ultrasound

Существуют **пассивные** и **активные** типы систем.

Пример активной системы реализован компанией **Bat system**, которая предложила использование метки излучателя для человека и микрофоны, улавливающие сигнал. Далее по алгоритмам трилатерации происходит расчёт местоположения. Благодаря определению направленности излучения можно

определить направление движения. Точность позиционирования – на уровне 3 см.

Уязвимость Ultrasonic технологии для активных меток заключается в том, что производительность системы позиционирования напрямую зависит от количества меток. Тем не менее компании Schweitzer and Syafudin удалось достичь точности в 1 см.

Пример пассивной технологии **Cricket system**, носимая метка пользователя в режиме приёмника, а излучатели установлены на потолке (рис. 8.16).

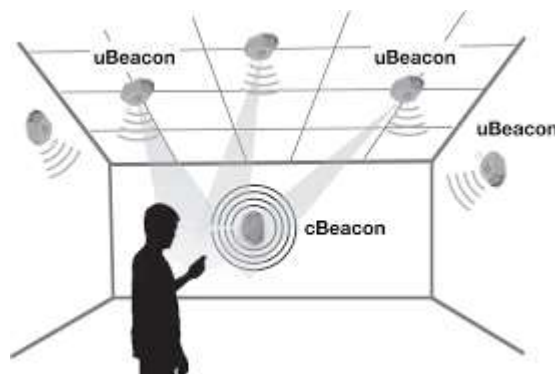


Рис. 8.16. Пассивная ультразвуковая технология определения местоположения

## IV ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МОБИЛЬНОГО ОБЪЕКТА

Большинство существующих сегодня локальных систем определения местоположения независимо от применяемой технологии требуют для своей успешной работы точного знания о координатах размещения маяков (базовых станций, точек доступа, сенсоров и пр.), о мощности излучения опорными передатчиками сигналов, о материале перегородок и перекрытий на пути распространения сигнала в помещении и о прочих влияющих факторах. Не всегда эти знания доступны разработчику и решение о координатах мобильного объекта приходится принимать на основе только измеряемых физических параметров – уровня мощности или времени.

Наиболее перспективным выходом из сложной ситуации представляется применение в системе позиционирования **глубокого машинного обучения** (нейронной сети).

**Машинное обучение** – раздел **искусственного интеллекта**, который позволяет выявлять взаимосвязи между объектами и принимать решения без явных команд программиста. Одной из разновидностей машинного обучения является **нейросеть** (**глубокое машинное обучение**), представляющая собой последовательность взаимодействующих между собой искусственных нейронов подобно взаимодействию биологических нейронов головного мозга. Рис. 8.17 демонстрирует соотношение понятий искусственного интеллекта, машинного обучения и нейронной сети.

Обучение системы происходит на **обучающих наборах данных** (англ. *training set*), достаточных по объёму для выявления закономерностей между входными и выходными данными. Каждый обучающий пример называется **обучающим образцом** (англ. *training sample*).



Рис. 8.17. Взаимодействие элементов искусственного интеллекта

Сегодня машинное обучение лежит в основе разнообразных высокотехнологичных процессов и может применяться в таких областях деятельности как выполнение поисковых запросов, распознавание видео, аудио или оптических данных, борьба с мошенничеством, осуществление маркетинговых стратегий, прогнозирование дохода (или убытка) компании и многих других. Определение координат мобильного объекта также относится к процессам, которые входят в сферу действия нейронной сети и машинного обучения.

Искусственные нейронные сети состоят из нескольких слоёв (рис. 8.18):

- входного слоя;
- одного или нескольких скрытых слоёв;
- выходного слоя.

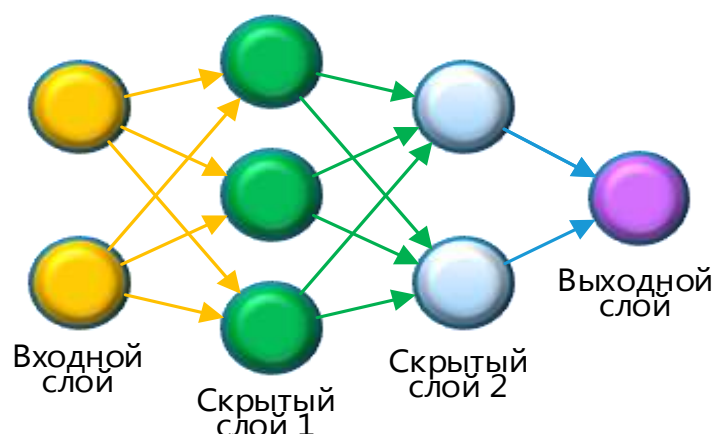


Рис. 8.18. Пример условной нейронной сети

Каждый слой выполняет определённые функции в нейросети, например, группировки, обобщения, классификации или распознавания информации.

Прежде чем выполнить поставленную перед нейронной сетью задачу, она проходит многократно повторяющиеся этапы обучения на заранее подготовленных и размеченных наборах данных большого объёма с установленными закономерностями. После чего обученная сеть может выявлять подобные закономерности на любых незнакомых ей наборах данных.

В качестве обучающего набора данных в системе определения местоположения может быть, например, большой объём измерений уровня RSSI сигнала, принятого от нескольких постоянно действующих базовых станций (точек доступа) в заранее размеченных точках помещения, выполненный несколькими независимыми измерительными устройствами. Эти данные представляются в удобной для компьютерной обработки форме, например, в виде таблиц или баз данных и затем будут использованы специализированным программным обеспечением для машинного обучения.

Пример обучающей выборки приведён в таблице 8.1.

Таблица 8.1. Фрагмент данных для машинного обучения

№ помещения	AP <sub>1</sub>	AP <sub>2</sub>	AP <sub>3</sub>	...	AP <sub>25</sub>	AP <sub>26</sub>	AP <sub>27</sub>
305	-100	-61	-100	...	-100	-100	-89
305	-100	-60	-100	...	-96	-100	-86
305	-100	-60	-100	...	-98	-100	-88
305	-100	-61	-100	...	-96	-100	-87
306	-95	-62	-100	...	-100	-55	-100
306	-89	-65	-100	...	-100	-58	-100
306	-85	-65	-100	...	-100	-60	-100
306	-87	-64	-100	...	-100	-59	-100

Значение -100 дБм заменяет нулевые значения в ячейках, в случае, когда сигнал от AP не доступен в данной измерительной точке.

## **Применение специализированных библиотек языка Python**

В настоящее время существует множество специализированных средств

для реализации нейронных сетей для различных целей, например, пакет Neural Network Toolbox (NNT) из программного обеспечения MATLAB или NeuroLab – библиотека базовых алгоритмов нейронных сетей с гибкими сетевыми конфигурациями и алгоритмами обучения для языка Python, распространяемая бесплатно по лицензии GNU Library or Lesser General Public License (LGPL).

Здесь будут описаны специализированные библиотеки языка Python, такие как TensorFlow и Keras.

TensorFlow – библиотека средств глубокого машинного обучения, разработанная компанией Google в виде надстройки к языку Python, в настоящее время может работать с другими языками программирования. TensorFlow объединяет в себе множество алгоритмов для создания нейронных сетей различного вида и назначения. Название библиотеки говорит о том, что она предназначена для эффективных вычислений с тензорами – многомерными массивами.

Keras – это API высокого уровня, который служит для облегчения процесса создания и обучения нейронной сети, основанной на применении средств библиотеки TensorFlow. Keras предлагает множество опций для работы с нейронной сетью, к ним относятся:

- функция активации определяет выходное значение нейрона в зависимости от средневзвешенной суммы входных и порогового значений.
- оптимизаторы содержат дополнительную информацию для повышения скорости и производительности конкретной модели.
- функция потерь определяет потери из-за неправильного принятия решений на основе обучающих данных.
- метрика используется для оценки качества работы конкретной модели.

Библиотека Keras содержит большое количество компонентов. Ниже рассматриваются наиболее часто используемые из них.

#### Функции активации:

- `sigmoid()` – сигмоидальная функция;
- `linear()` – линейная функция;
- `tanh()` – гиперболический тангенс;
- `relu()` – функция линейной ректификации;
- `exponential()` – экспоненциальная функция;
- `softmax()` – преобразует вектор значений в распределение вероятностей.

#### Оптимизаторы:

- `SGD()` – стохастический градиентный спуск;
- `RMSprop()` – алгоритм обратного распространения ошибки;
- `Adagrad()` использует алгоритм Adagrad, который адаптирует скорость обучения к частоте обновления параметров обучения, что ускоряет сходимость при сильно разреженных данных;
- `Adam()` использует алгоритм Adam, который является модификацией



алгоритма Adagrad, использующей сглаженные версии среднего и среднеквадратического градиентов.

#### Функции потерь:

- `CategoricalCrossentropy()` – категориальная перекрёстная энтропия;
- `BinaryCrossentropy()` – двоичная перекрёстная энтропия;
- `MeanSquaredError()` – среднеквадратическая ошибка;
- `KLDivergence()` – расстояние Кульбака — Лейблера;
- `CosineSimilarity()` – косинус угла между реальным и предсказанным значением.

#### Метрики:

- `Accuracy()` – количество положительных исходов обучения;
- `BinaryAccuracy()` – бинарная точность;
- `AUC()` – площадь под кривой ошибок. Чем ближе значение этого показателя к единице, тем выше качество модели;
- `Precision()` – количество истинно положительных исходов обучения из всех исходов, которые были определены как положительные;
- `Recall()` – полнота, или чувствительность, показывает, какую долю положительных исходов удалось выявить.

### **Моделирование на языке Python**

Ниже описаны примеры создания и применения моделей глубокого машинного обучения на языке Python.

#### Создание однослойной модели:

```
model = tf.keras.Sequential([keras.layers.Flatten(
input_shape = [27, ]), Dense(units = 1, activation = 'relu')])
```

Здесь `input_shape` – это размер входного вектора, `units` – количество нейронов в слое.

#### Создание трёхслойной модели:

```
model = tf.keras.Sequential([keras.layers.Flatten
(input_shape = [27, ]),
Dense(units = 200, activation = 'relu'),
Dense(units = 50, activation = 'relu'),
Dense(units = 10, activation = 'relu')])
```

#### Компиляция модели:

```
model.compile(optimizer = keras.optimizers.RMSprop(
learning_rate = 0.0001,
centered = True),
loss = keras.losses.MeanSquaredError(),
metrics = [keras.metrics.Accuracy()])
```

#### Обучение модели:

```
model.fit(xs, ys, epochs = 2000)
```

Здесь `xs` – входная (обучающая) выборка, `ys` – вектор выходных значений (результат), `epochs` – количество эпох обучения.

#### Сохранение обученной нейронной сети:

```
file = 'model.keras'  
model.save(file)
```

Обученную нейронную сеть можно применить к тестовому набору данных для целей позиционирования мобильного объекта.

#### Предсказание результата с тестовыми данными из массива p:

```
yy = model.predict(p)
```

### **Недостатки применения нейронной сети к определению местоположения мобильного объекта**

1) создание обучающего набора данных связано с проведением очень большого количества измерений, которые отнимают много времени и требуют последующей компьютерной обработки;

2) процесс машинного обучения требует мощных вычислительных ресурсов компьютера (процессор, оперативная память, видеопамять) и при большом количестве эпох обучения, требуемого для обеспечения приемлемой точности позиционирования, – больших временных затрат;

3) при изменении окружающих условий (изменении радиообстановки в помещении – например, выключили или переставили точки доступа) необходимо полное переобучение модели, начиная с создания нового обучающего набора данных, и см. пп.1-2.