

***Кафедра Радиотехнических систем  
(РТС)***

***Курс***

***Навигационно-связные радиосистемы***

***Семинар №6.***

***НСРС на базе WiFi***

# Литература

1. <https://wicle.net/>
2. <https://www.skyhookwireless.com/>
3. <http://appcrawlr.com/ios/open-wifi-spots-free-offline-wi>
4. <https://habrahabr.ru/company/cisco/blog/270779/>
5. <https://habrahabr.ru/post/306044/>
6. <https://appelsiini.net/2017/trilateration-with-n-points/>
7. <https://pdfs.semanticscholar.org/e796/6215ebe9df591c43794dcff5024a088cb80d.pdf>
8. (2017) Определение взаимной ориентации и положения транспортных средств – Корогодин И.В., Днепров В.В.

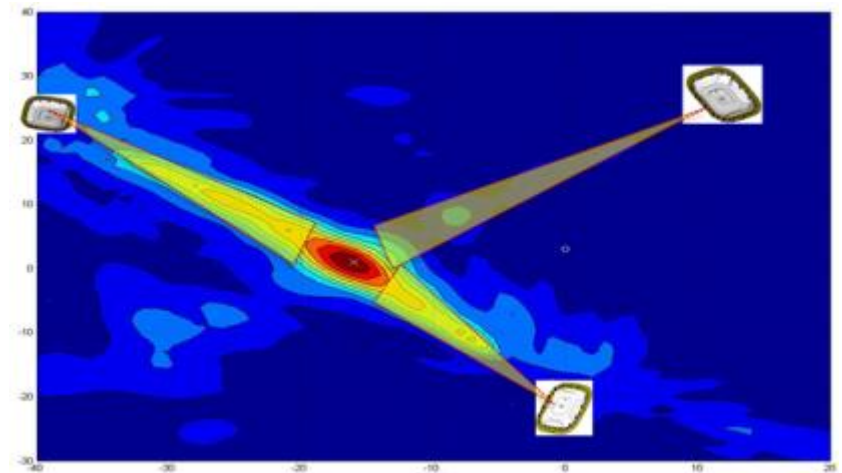
**WiFi – навигация в локальной СК. Базы данных WiFi точек – некая, хоть какая-то, привязка к глобальным координатам.**

## **WiFi IEEE 802.11 Networks (WLAN)**

Альтернативный навигационный метод на базе беспроводных сетей Wi-Fi стандарта IEEE 802.11

IEEE 802.11 – базовый стандарт для сетей Wi-Fi, который определяет набор протоколов для самых низких скоростей передачи данных (transfer).

Стандарты предполагают использование диапазонов: 2,4; 3,6 и 5 ГГц для беспроводной передачи данных. В России диапазон 3,6 ГГц не используется.



**WiFi – навигация в локальной СК. Базы данных WiFi точек – некая, хоть какая-то, привязка к глобальным координатам (продолжение).**

Сегодня наиболее востребованы стандарты:  
802.11b, 802.11a, 802.11g и 802.11n.

**Таблица 1. Характеристики стандарта IEEE 802.11 WLAN**

Table 1: <b>IEEE 802.11 WLAN Standards</b>				
Designation	Ratification date	Band	Data rate	Modulation/access
802.11	1997	2.4 GHz	1 and 2 Mbits/s	FHSS, DSSS, CCK
802.11a	1999	5 GHz	54 Mbits/s	OFDM, BPSK, QPSK, QAM
802.11b	1999	2.4 GHz	11 and 5.5 Mbits/s	DSSS, CCK
802.11g	2002	2.4 GHz	54 Mbits/s	OFDM, BPSK, QPSK, QAM
802.11n	2007*	2.4 and 5 GHz	100 to 320 Mbits/s	OFDM, MIMO

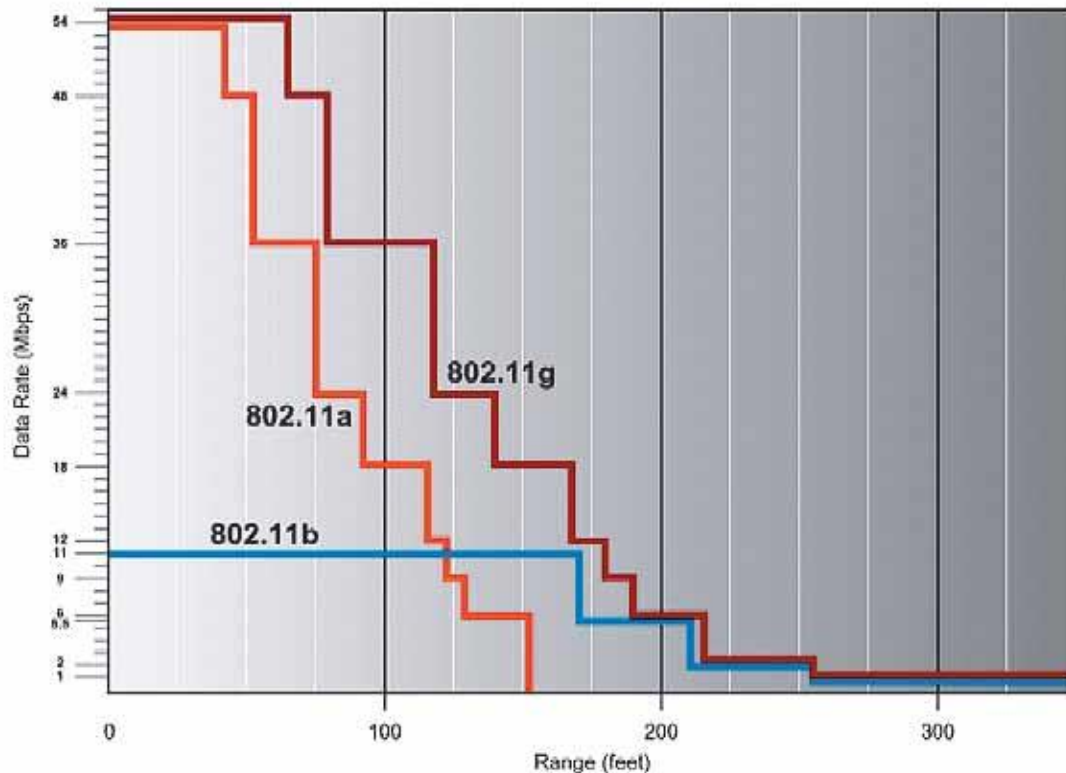
В зависимости от количества пользователей, в адрес которых осуществляется одновременная передача данных, выделяются:

- однопользовательские системы MIMO (Single User MIMO или SU-MIMO);
- многопользовательские системы MIMO (Multi User MIMO или MU-MIMO).

**WiFi – навигация в локальной СК. Базы данных WiFi точек – некая, хоть какая-то, привязка к глобальным координатам (продолжение).**

**MIMO** — метод пространственного кодирования сигнала, позволяющий увеличить полосу пропускания канала, в котором передача данных и прием данных осуществляются системами из нескольких антенн.

## Зона покрытия беспроводной сети



**Рис.1.** Сравнение стандартов беспроводной связи по скорости и зоне покрытия

**WiFi – навигация в локальной СК. Базы данных WiFi точек – некая, хоть какая-то, привязка к глобальным координатам (продолжение).**

Для технологии Wi-Fi существуют ограничения на технические характеристики оборудования ( в первую очередь это **ЭИИМ** - эквивалентная изотропно-излучаемая мощность)

ЭИИМ точек доступа: в диапазоне 20-30 дБм (100 – 1000 мВт)

В наиболее распространенном в России диапазоне 2,4 ГГц ограничение составляет 250 мВт.

### **Принципы работы системы позиционирования WIFI (WPS)**

**Система позиционирования Wi-Fi (WPS)** — навигационная система позиционирования, основывающаяся на определении координат по Wi-Fi точкам.

Основным поставщиком услуг позиционирования WPS является компания **Skyhook Wireless**.

Крупным провайдером также является российская фирма **AlterGeo**.

**WiFi – навигация в локальной СК. Базы данных WiFi точек – некая, хоть какая-то, привязка к глобальным координатам (продолжение).**

## **Принципы работы системы позиционирования WIFI (WPS)**

**Наиболее простой способ позиционирования в сетях WiFi – по факту подключения к конкретной базовой станции.**

Радиус действия точек доступа WiFi составляет от 30 до 200 метров, в зависимости от конкретного исполнения.

Точность позиционирования в системах с применением специальных расширений WiFi относительно невысока и составляет в идеальных условиях **3-5 метров**, в реальности **10-15 метров**.

Типичные параметры, необходимые для привязки точки доступа (ТД) Wi-Fi или точки беспроводного доступа, включают: SSID и MAC-адрес (MAC address) ТД.

**Точность зависит от количества позиций, которые были введены в базу данных (БД).**

**WiFi – навигация в локальной СК. Базы данных WiFi точек – некая, хоть какая-то, привязка к глобальным координатам (продолжение).**

**Навигация по сигналам Wi-Fi сети основана на следующих принципах:**

1. предполагается, что координаты ТД известны с некоторой точностью и хранятся в сформированной БД;
2. любая ТД передает в эфир свой индивидуальный номер – MAC-адрес;
3. любое принимающее устройство (Wi-Fi) может считывать MAC-адреса и принимаемый уровень сигнала (RSS), приходящий от ТД с этим MAC-адресом.

**Навигация при помощи Wi-Fi** разбивается на 2 этапа:

- составление базы данных, где хранится информация о координатах ТД;
- реализация алгоритма определения местоположения.

На сегодняшний день глобальными БД ТД обладают **Skyhook Wireless** и **Google**.



**WiFi – навигация в локальной СК. Базы данных WiFi точек – некая, хоть какая-то, привязка к глобальным координатам (продолжение).**

Возможен также расчет координат на основе **геометрических соотношений** путем решения системы нелинейных уравнений при известном расстоянии между пользователем и, как минимум, тремя базовыми станциями.

Одним из решений является измерение времени прохода сигнала от приемника до точки доступа и обратно

**Метод позиционирования по точке доступа, к которой присоединен клиент,** имеет преимущество простоты, но в точности страдает.

Зона действия беспроводной сети может быть довольно большой, диаметр пятна засветки может быть 50 м и более.

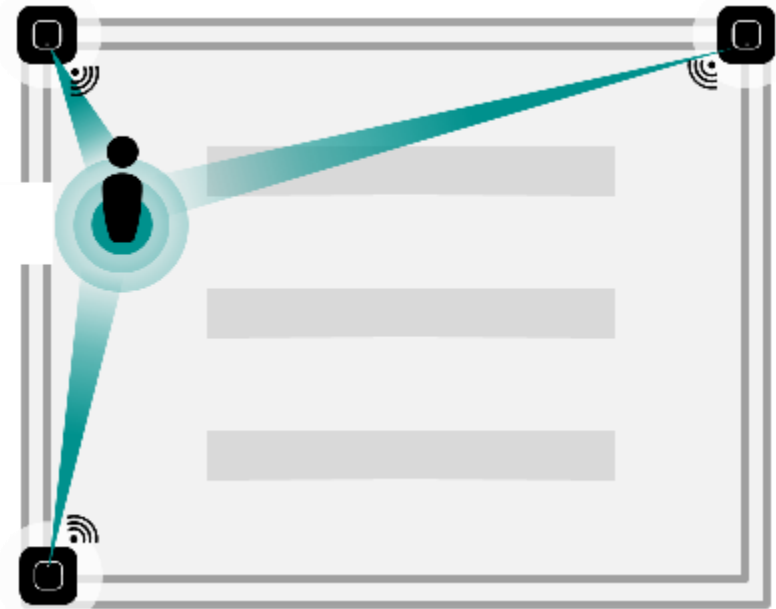
Метод скорее позволяет определить присутствие клиента, чем спозиционировать его.

**Оценка расстояния до точки доступа по мощности принимаемого сигнала. Построение позиционной навигации. Примеры, достигаемая точность и другие параметры.**

RSS – метод определения расстояния по принимаемой мощности сигнала;

RSSI – индикатор уровня принимаемого сигнала.

Данный метод является довольно информативным и при правильном развесе ТД позволяет с высокой вероятностью определить координату клиента с **точностью 5-7м. (см. рис.2)**



Для повышения точности позиционирования в сети Wi-Fi ТД необходимо ставить чаще, т.к. угасание сигнала и расстояние от точки доступа имеют экспоненциальную зависимость.

Оценка расстояния до точки доступа по мощности принимаемого сигнала. Построение позиционной навигации. Примеры, достигаемая точность и другие параметры (продолжение).

Сеть Wi-Fi с возможностями позиционирования помимо ТД и контроллера беспроводной сети получает еще один элемент, который будет производить вычисления координат и накапливать данные для аналитики — **Mobility Services Engine (MSE)**.

Сегодня емкость **MSE** позволяет накапливать данные со 100 000 клиентских устройств в течение 2-8 лет.

Реализация позиционирования на сети Wi-Fi ведет к дополнительным затратам на развертывание инфраструктуры, при этом низкие затраты на эксплуатацию сети.

Оценка расстояния до точки доступа по мощности принимаемого сигнала. Построение позиционной навигации. Примеры, достигаемая точность и другие параметры (продолжение).

**Методы трилатерации** (Trilateration) могут использоваться для вычисления приблизительной позиции (положения) клиентского устройства относительно известного положения ТД.

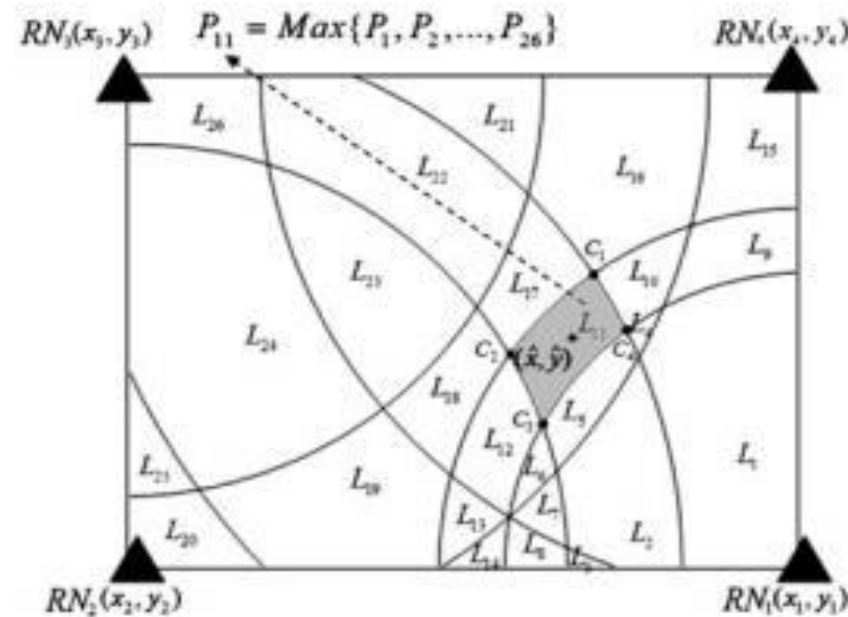
Для определения положения объекта по **методу трилатерации** необходимо измерить **дальность** от **него** до **трех** фиксированных точек.

Для повышения точности используют **мультилатерацию** (Multilateration), т.е. используют **более трех** реперных станций.

Для повышения точности проводят несколько измерений дальности, прежде чем решать навигационную задачу.

Оценка расстояния до точки доступа по мощности принимаемого сигнала. Построение позиционной навигации. Примеры, достигаемая точность и другие параметры (продолжение).

Рис.3. Определение местоположения по методу мультилатерации



Достоинства RSS:

один из самых дешевых и простых способов реализации

Недостатки RSS:

- не очень высокая точность (порядка 2 – 4 метров)
- подвержены влиянию отражений и интерференций

# Примеры, достигаемая точность и другие параметры (продолжение).

Авторы одной из статей предлагают неконтролируемый метод внутренней локализации RSS

Рис.4. План этажа офисных зданий

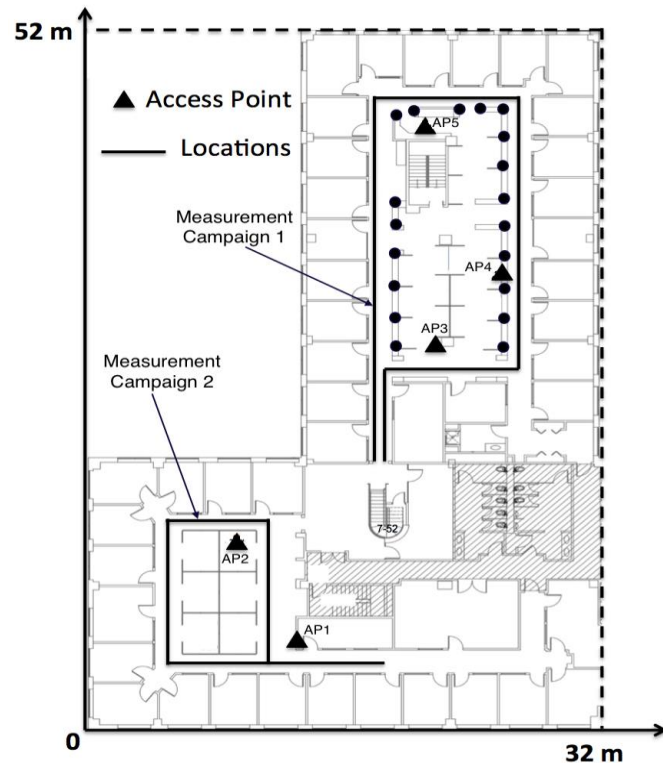
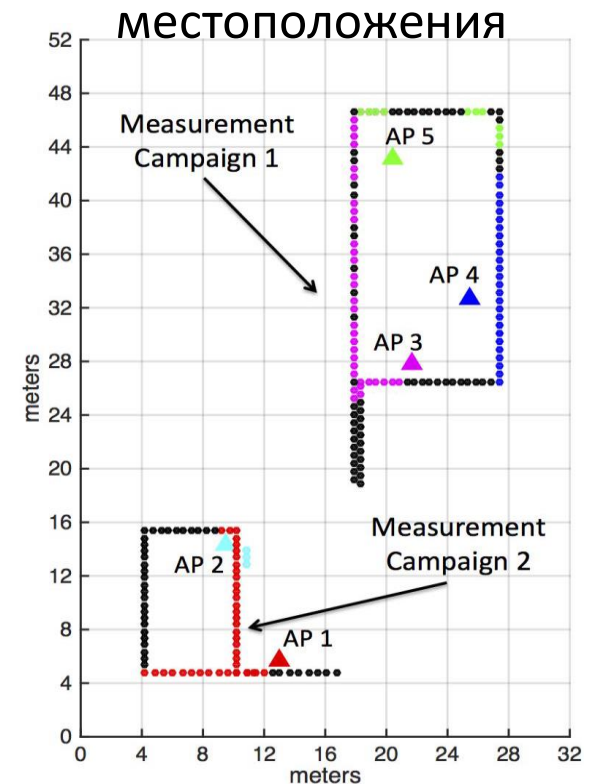


Рис. 5. Цветная маркировка местоположения



Алгоритм экспериментально протестирован в области офисных площадей размером от 32 до 52 м (1600 м<sup>2</sup>) с пятью ТД, а достигнутая средняя ошибка локализации составляет менее 4,5 м.

## Оценка расстояния до точки доступа по мощности принимаемого сигнала. Построение позиционной навигации. Примеры, достигаемая точность и другие параметры (продолжение).

Уровни принятых сигналов измеряются с помощью конкретного WiFi модуля, работающего на частоте 2,4 ГГц, который выделяет маяки, связанные с ТД от принятого сигнала и выводит уровень сигнала для каждой ТД с его идентификаторами (MAC-адресом и SSID).

Таблица 2. Высоты точек доступа относительно измерительного модуля RSS

AP1	AP2	AP3	AP4	AP5
1.49 m	0.37 m	1.58 m	0.2 m	0.39 m

### Примечание:

Всего пять точек доступа: AP1, AP2, AP3, AP4, AP5.

# Примеры, достигаемая точность и другие параметры (продолжение).

## Измерения уровня сигналов по методу RSS

Рис.6. В **первой** измерительной кампании

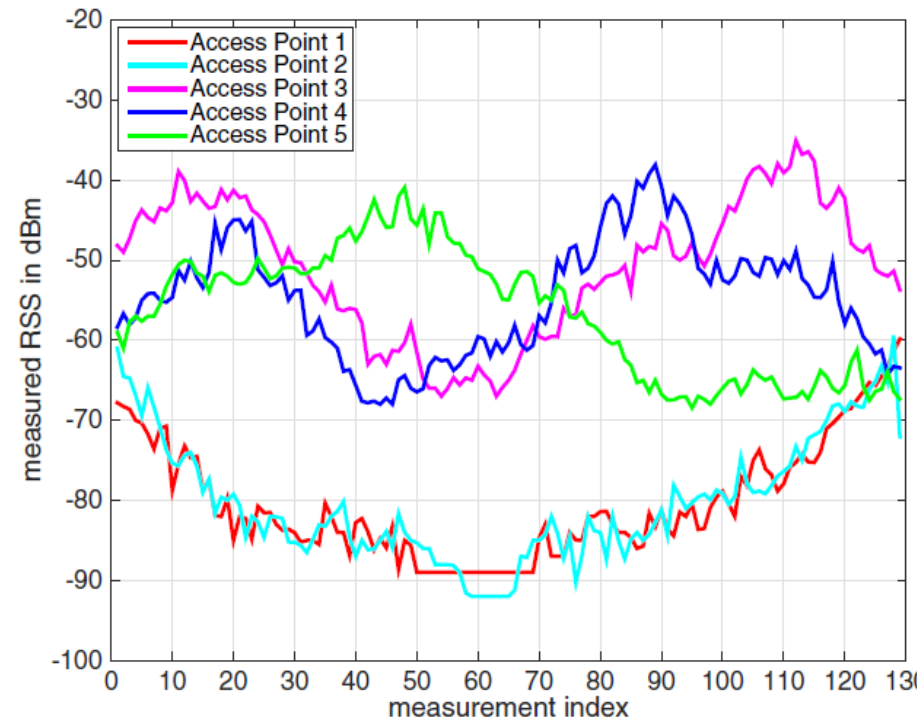
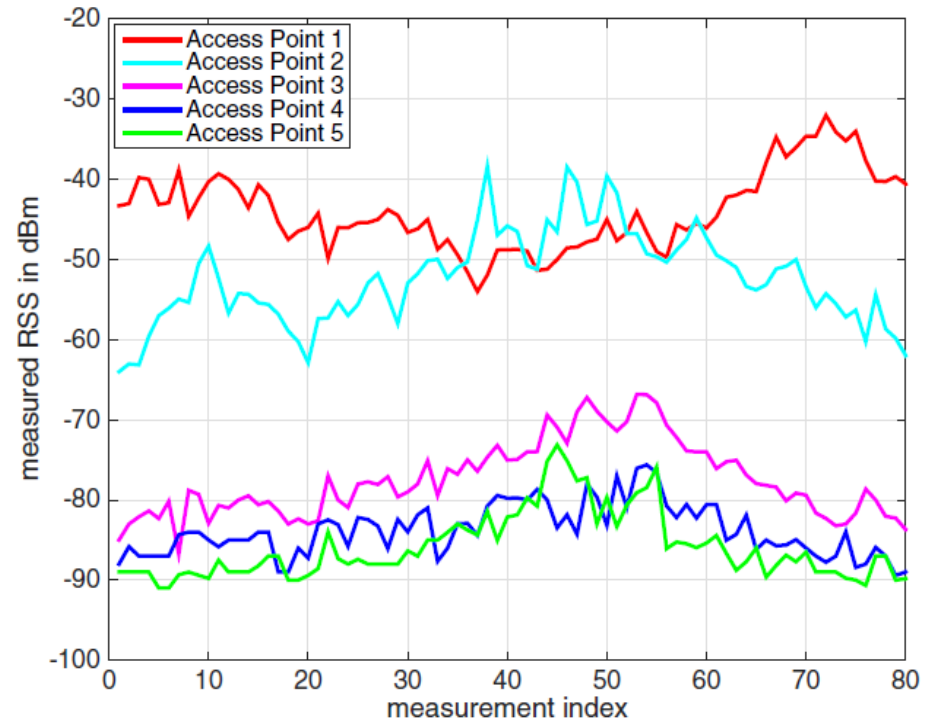


Рис.7. Во **второй** измерительной кампании



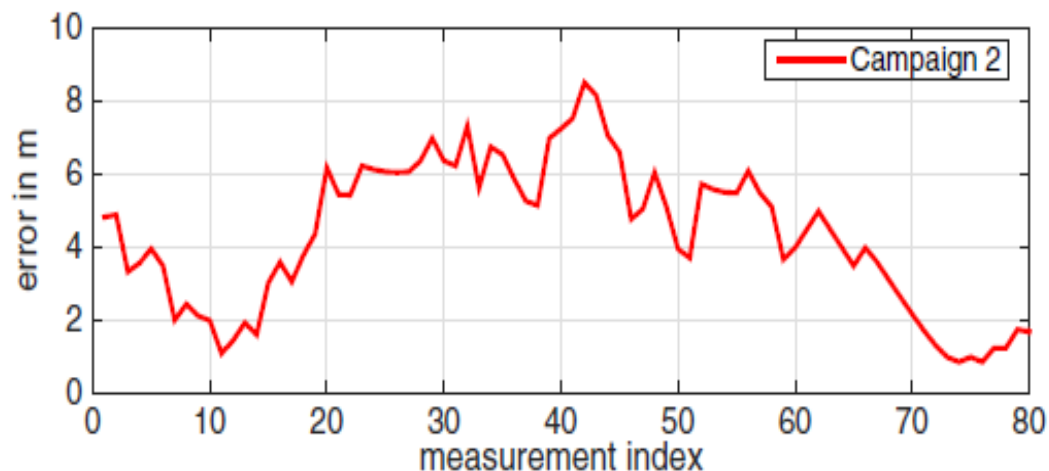
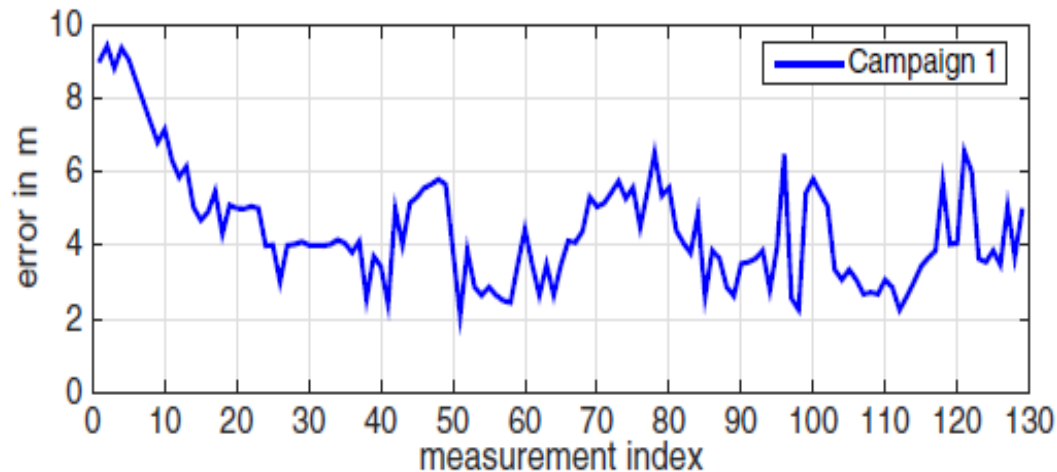
### Примечание:

measured RSS in dBm – измеренные уровни сигналов в [дБм];  
measurement index – индекс (номер) измерения;  
access point 1..5 – точка доступа 1..5.



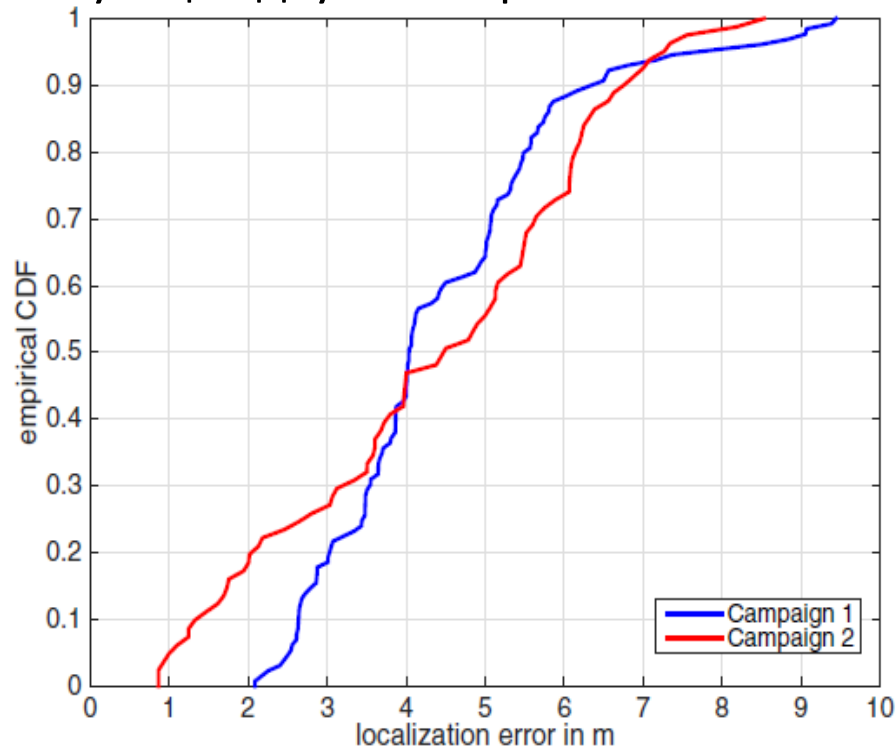
# Примеры, достигаемая точность и другие параметры (продолжение).

**Рис.8.** Зависимость ошибки локализации от индекса (номера) измерения местоположения для кампании 1 (синий график) и кампании 2 (красный график)



# Примеры, достигаемая точность и другие параметры (продолжение).

**Рис.9.** Практические функции общего (совокупного) распределения (CDF), соответствующие двум измерительным кампаниям



**Таблица 3.** Статистика ошибок локализации для двух кампаний

percentiles	25%	50%	75%	90%	mean
Campaign 1	3.44 m	4.04 m	5.32 m	6.33 m	<b>4.46 m</b>
Campaign 2	2.65 m	4.38 m	6.06 m	6.63 m	<b>4.36 m</b>

Средняя ошибка локализации в обоих тестах: **ниже 4,5 м.**

## Примеры, достигаемая точность и другие параметры (продолжение).

С появлением WiFi интерфейсов **MIMO**, которые используют несколько антенн, можно оценить **АоА (угол прихода)** сигналов многолучевого распространения, полученных на антенных решетках в ТД, и применить **триангуляцию** для расчета местоположения клиентских устройств.

SpotFi, ArrayTrack и LTEye – предлагаемые решения, в которых используется такая техника.

Типичное вычисление угла прихода сигнала АоА выполняется с помощью алгоритма **MUSIC (Multiple Signal Classification)**.

**MUSIC** – это алгоритм, используемый для оценки частоты и местоположения излучателя. Он оценивает частотное содержание сигнальной или автокорреляционной матрицы, используя метод электронного измерения.

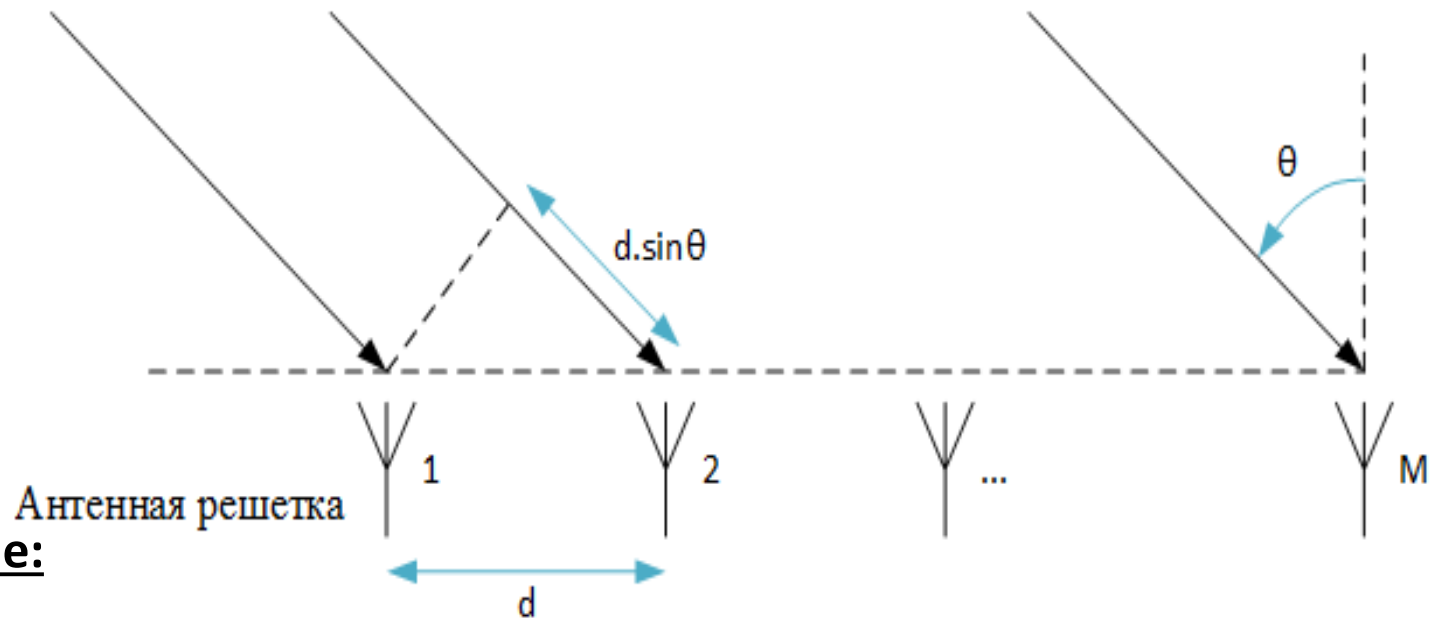
Во многих практических задачах обработки сигналов целью является оценка из измерений набора постоянных параметров, от которых зависят принятые сигналы.

Несмотря на существенные преимущества MUSIC, они достигаются за счет затрат на вычисления (поиск по пространству параметров) и хранения (данных калибровки массива).

# Примеры, достигаемая точность и другие параметры (продолжение).

Рис.10. Равномерная линейная антенная решетка

Направление прихода сигналов



Антенная решетка

## Примечание:

$k^{th}$  путь распространения сигнала поступает с углом  $\theta_k$

$\gamma_k$  – это затухание, возникающее на любой антенне решетки.

Сигнал поступает с дополнительной фазой  $-2\pi \cdot d \cdot \sin(\theta) \cdot f / c$  на вторую антенну и с фазой  $-2\pi \cdot d \cdot (m-1) \cdot \sin(\theta) \cdot f / c$  на  $m^{th}$  антенну

$$\phi(\theta_k) = \exp(-j2\pi \cdot d \cdot \sin(\theta_k) \cdot f / c)$$

## Примеры, достигаемая точность и другие параметры (продолжение).

$\vec{\alpha}(\theta_k) = [1, \phi(\theta_k), \dots, \phi(\theta_k)^{M-1}]^T$  — управляющий вектор

$\mathbf{A} = [\vec{\alpha}(\theta_1), \dots, \vec{\alpha}(\theta_L)]$  — управляющая матрица (размером  $M * N$ )

$\vec{x} = \mathbf{A}\vec{\Gamma}$  — принятый вектор сигнала

$\vec{\Gamma} = [\vec{\gamma}_1 \dots \vec{\gamma}_L]$  — векторные комплексные составляющие затухания вдоль пути  $L$

Ортогональное мультиплексирование с частотным разделением OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) передает данные по множеству разных поднесущих

$\mathbf{X} = [\vec{x}_1 \dots \vec{x}_L] = \mathbf{A}[\vec{\Gamma}_1 \dots \vec{\Gamma}_L] = \mathbf{A}\mathbf{F} \rightarrow$  матрица принимаемых сигналов, соответствующих каждой поднесущей

Матрица  $\mathbf{X}$  задается матрицей информации о состоянии канала (Channel state information – CSI), которая может быть извлечена из современных беспроводных карт специальными инструментами, такими как инструмент 802.11n для Linux.

## Примеры, достигаемая точность и другие параметры (продолжение).

**OFDM** является методом кодирования цифровых данных на нескольких несущих частотах.

### Приложения:

цифровое телевидение и аудиовещание, доступ к интернету DSL , беспроводным сетям, сетевым сетям и мобильным коммуникациям 4G.

### Алгоритм MUSIC

$\mathbf{X}\mathbf{X}^H$  — собственные векторы

$\mathbf{X}^H$  является сопряженным транспонированием вектора  $\mathbf{X}$

Хотя обычно этот метод более точен, чем другие, для развертывания может потребоваться специальное оборудование, такое как **антенная решетка из шести-восьми антенн** или **из вращающихся антенн**.

Метод SpotFi (метод определения местоположения на уровне дециметров с использованием Wi-Fi) предлагает использовать алгоритм Super-resolution imaging (SR) (изображения с высоким разрешением – это класс методов, которые улучшают разрешение системы обработки изображений).

Time of Flight - TOF (время полета); Time of Arrival – TOA (время прибытия)

# Корреляционно-экстремальная (обзорно-сравнительная) навигация по полю WiFi. Примеры, достигаемая точность и другие параметры.

**Метод «Fingerprinting»** (дословно – «отпечаток пальца») относится к корреляционно-экстремальному (или обзорно-сравнительному) методу.

**Позиционирование происходит в 2 стадии:**

1. производится формирование базы данных об электромагнитной обстановке в интересующем помещении (чаще RSS);
2. производится непосредственно позиционирование.

В данном методе разделяют **две фазы: Offline** (фаза предварительного обучения) и **Online** (т.е. онлайн-отслеживание).

В корреляционно-экстремальных системах фаза **Offline** — это **«портрет» мощностей** отраженных сигналов от отдельных предметов/участков с известными координатами

Традиционный метод **«Fingerprinting»** основан на сопоставлении измеряемых пользователем мощностей принимаемых сигналов, как и в методе RSS, от нескольких окружающих ТД Wi-Fi в диапазоне с заранее измеренными значениями, хранящимися в БД с привязкой к координатам.

Этот метод, по сути, представляет собой метод навигации с использованием данных карты – **map-matching**.

# Корреляционно-экстремальная (обзорно-сравнительная) навигация по полю WiFi. Примеры, достигаемая точность и другие параметры (продолжение).

Точность такого подхода зависит от количества точек в базе, то есть точек с известными координатами и RSS. Это количество ограничивается разумным объемом базы данных и трудоемкостью ее составления.

Такой подход целесообразно использовать при позиционировании **внутри задний** и на специализированных **ограниченных** территориях – кампусах, госпиталях, бизнес центрах и т.п.

Большая трудоемкость при составлении базы данных и требования к постоянству Wi-Fi точек делают такой подход трудно применимым для навигации **на улице**.

Как можно отметить из литературы системы на основе **метод «Fingerprinting»** могут обеспечить среднюю точность, равную **0,6 м**, и точность хвоста **1,3 м**.

## Основной недостаток:

любые изменения окружающей среды, такие как добавление или удаление мебели или зданий, могут изменить **«отпечаток пальца»**, соответствующий каждому местоположению



# Примеры, достигаемая точность и другие параметры (продолжение).

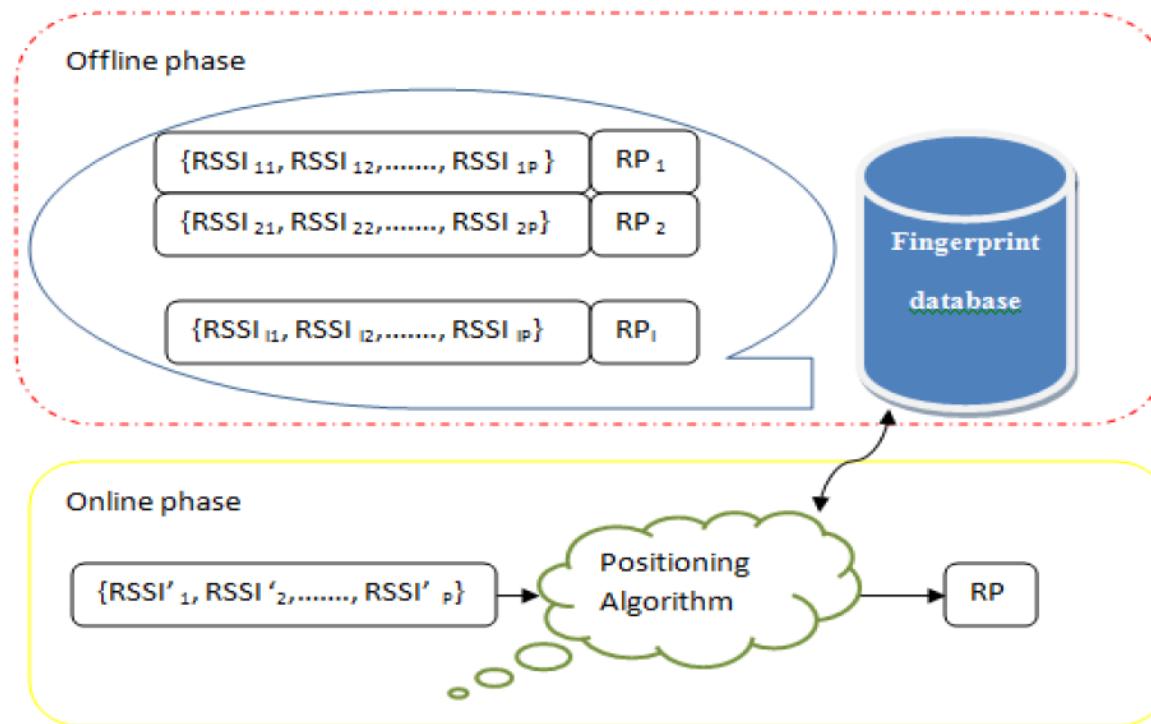
Сохраненный вектор каждой контрольной точки содержит в себе:

(MAC, SSID, Channel, RSSI) (1)

$RPI = \{RSSI_{I1}, RSSI_{I2}, \dots, RSSI_{Ip}\}$  (2) – точкой отсчета (базовой точкой) индекса  $I$ ;

RSSI – принимаемая мощность сигнала в отпечатке пальца;  $p$  – количество видимых ТД.

**Рис.11. Схема позиционирования отпечатков пальцев**

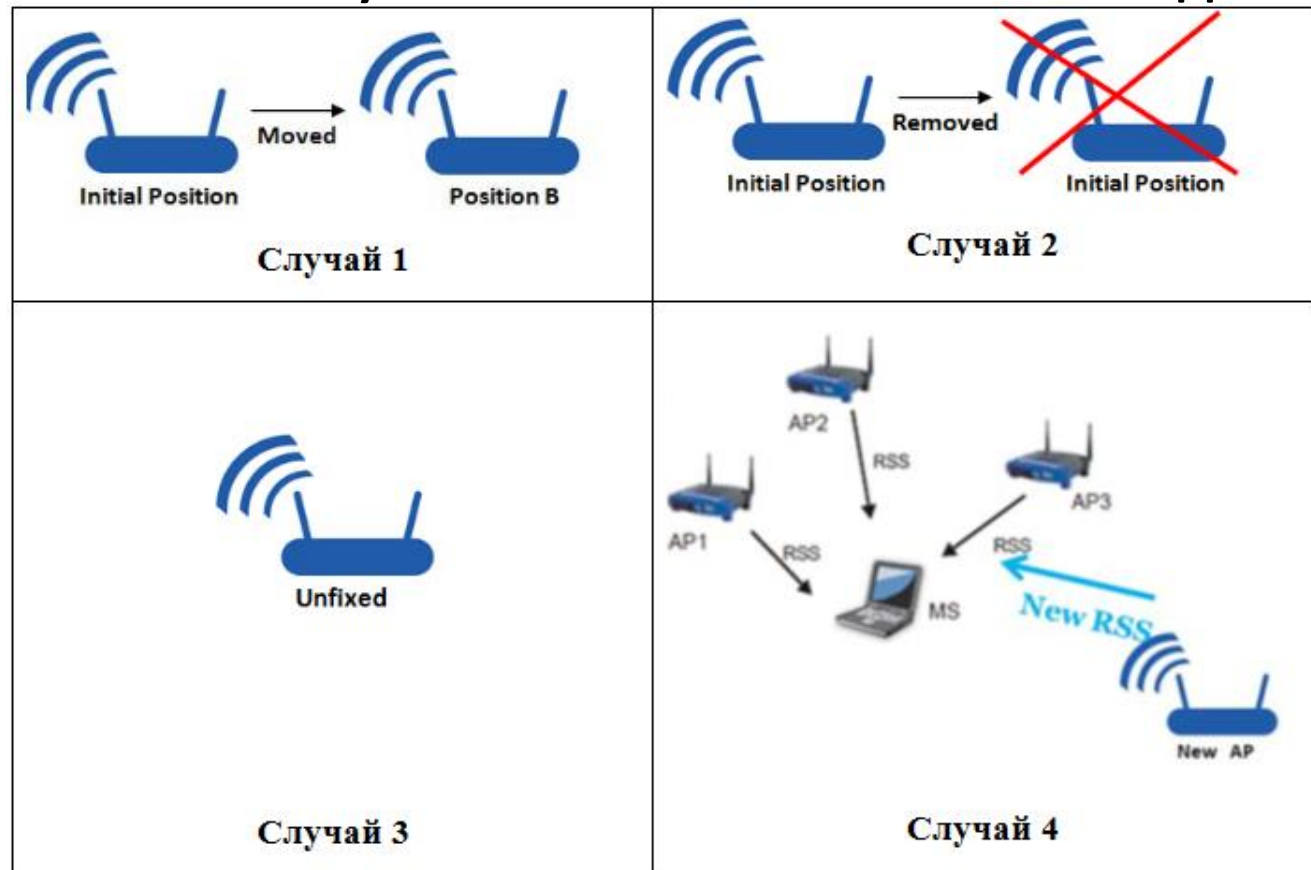


# Примеры, достигаемая точность и другие параметры (продолжение).

## Обновление базы данных.

Чтобы смягчить последствия изменения положения ТД и эффективно обнаруживать изменения в окружающей среде с течением времени, были установлены некоторые ограничения, и только небольшая часть исходной БД может быть изменена.

**Рис.12. 4 случая изменения местоположения ТД**



## Примеры, достигаемая точность и другие параметры (продолжение).

Для позиционирования по радиоотпечаткам в сетях Wi-Fi достаточно стандартного оборудования (базовых станций, излучающих сигналы; мобильного устройства, измеряющего уровень принимаемых сигналов).

С ростом числа используемых базовых станций растет **точность** и вероятность правильного принятия решения.

Для правильного определения местоположения применяются различные математические алгоритмы.

В последнее время популярными являются методы k-ближайших соседей и алгоритмы на основе нейронных сетей.

**Метод определения местоположения по ближайшим соседям:**

$$Z = \sqrt{\sum_{i=0}^n w_i (S_{obs} - s_i)^2} \frac{1}{c},$$

где  $S_{obs}$  – вектор измерений до каждой точки доступа;

$s_i$  – соответствующие значения интенсивности в точках измерений, полученные в процессе фазы сбора данных;

$c$  – число полученных измерений уровня сигнала;

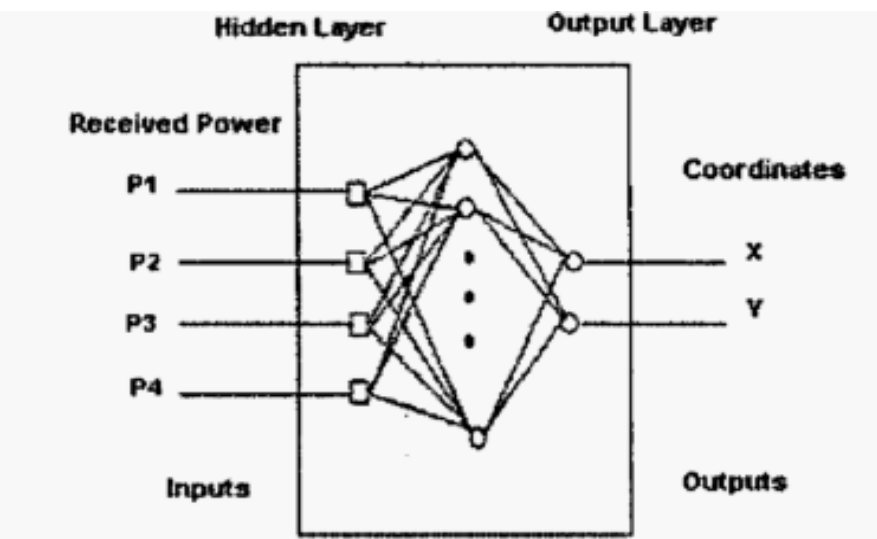
$w_i$  – весовой коэффициент.

# Примеры, достигаемая точность и другие параметры (продолжение).

## Алгоритмы на основе искусственных нейросетей.

На стадии сбора данных и формирования карты интенсивности принимаемых сигналов производится обучение нейросети.

**Рис.13. Схема искусственной нейросети**



С помощью искусственной нейросети определялось положение мобильного робота в закрытом помещении с **точностью до 0,5 м в 90 % случаев.**

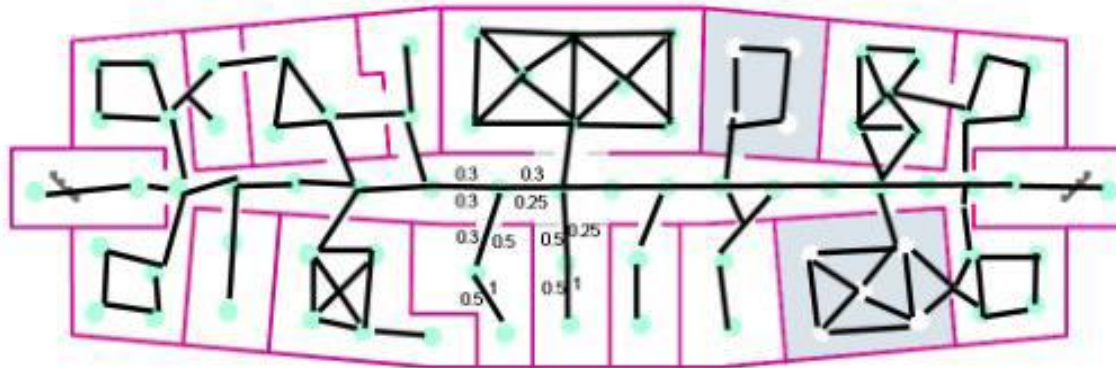
В реальных условиях типичное значение **точности** составляет около **5 м.**

Любые изменения в окружающей среде существенно изменяют картину распределения интенсивности принимаемых сигналов, что существенно сказывается на точности определения местоположения.

## Примеры, достигаемая точность и другие параметры (продолжение).

Для **улучшения точности** определения местоположения с использованием радиотпечатков, применяются дополнительные математические модели, например, скрытая Марковская модель.

**Рис.14. Карта радиотпечатков**



Такой подход позволяет исключить ошибочные переходы между стенами и этажами, и исключает резкие скачки при перемещении. Таким образом, повышается достоверность принятия решения.

## Примеры, достигаемая точность и другие параметры (продолжение).

**Позиционирование устройства в сети Wi-Fi** может использоваться для целого ряда приложений:

- А) обнаружение активов, помеченных метками Wi-Fi;
- Б) подключение к сети Wi-Fi с учетом местонахождения клиента;
- В) навигация по помещению;
- Г) отправка высокоэффективных предложений с учетом местонахождения клиента;
- Д) сбор аналитики поведения клиентов.

Для повышения частоты определения координаты разработчики **Cisco** реализовали метод позиционирования устройства по трафику данных, что позволило увеличить частоту сбора данных **до 10 раз в минуту — FastLocate**.

**FastLocate** может быть реализован на отдельном модуле для модульных точек доступа Cisco Aironet серий 3600 и 3700.

Клиентское устройство должно быть подключено к сети Wi-Fi.

Если в результате большая доля клиентов подключится, владелец площадки сможет извлечь для себя много информации из подобной аналитики.